



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**ASPEKTY OVLIVŇUJÍCÍ TRENDY V TECHNOLOGII
PROVOZU LETADLOVÉ TECHNIKY CIVILNÍHO LETECTVÍ**

ASPECTS IMPACT TRENDS IN THE OPERATION TECHNOLOGY OF CIVIL AVIATION AIRCRAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Korytář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Jan Korytář**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Letecký provoz
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aspekty ovlivňující trendy v technologii provozu letadlové techniky civilního letectví

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu vývoje civilního letectví se postupně měnily požadavky na technicko provozní charakteristiky letadlové techniky. Tyto změny je neustále nutno sledovat a vyhodnocovat pro zajištění provozní efektivity a včasné reakce v konstrukční a výrobní oblasti.

Cíle diplomové práce:

Cílem je provést analýzu požadavků na technicko–provozní charakteristiky letadlové techniky, a vyhodnocení jejich vlivu na vývoj letadlové techniky, včetně predikce současného vývoje.

Seznam doporučené literatury:

Zákon o civilním letectví č.49/1997 Sb.

Letecký předpis L6, Letecká informační služba ČR, 2019.

Letecký předpis L8, Letecká informační služba ČR, 2018.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je všeobecný popis vlivů na letecký provoz a leteckou techniku. První část práce je věnována stručnému popisu rozvoje jednotlivých technických parametrů a výkonů letadel od 20. let 20. století po současnost s posouzením působících vlivů. V druhé části práce je vliv současných požadavků a v třetí části celkový pohled na budoucí rozvoj konstrukce a technologie pro úspornější a ekologičtější leteckou dopravu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technologické parametry, emise, hlučnost, ropná krize, konstrukce, samokřídlo, palivo, elektromotor, dvojitý tubus, hybrid, IATA, znečištění, skleníkové plyny, spotřeba, biopalivo.

ABSTRACT

The aim of the work is a general description of the effects on air traffic and aircraft. The first part of the work is devoted to a brief description of the development of individual technical parameters and performance of aircraft from the 1920s to the present with an assessment of the effects. The second part of the work is about the influence of current requirements and the third part is a general view of the future development of construction and technology for more economical and environmentally friendly air transport.

KEYWORDS

Technological parameters, emissions, noise, oil crisis, construction, wing, fuel, electric motor, double tube, hybrid, IATA, pollution, greenhouse gases, consumption, biofuel.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KORYTÁŘ, Jan. *Aspekty ovlivňující trendy v technologii provozu letadlové techniky civilního letectví* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132948>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Jiří Chlebek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Chlebka Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2021

Jan Korytář

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jirímu Chlebkovi, Ph.D. za rady a pomoc při zpracovávání mé diplomové práce.

OBSAH

Obsah	- 13 -
Úvod	- 17 -
Minulý vývoj.....	- 18 -
1. Vývoj technicko-provozních parametrů letadel pro přepravu cestujících	- 18 -
1.1 Historie motorů.....	- 19 -
1.2 Analýza vývoje energetické náročnosti letadel přepočtené na 1 sedadlo a uletěný kilometr od 50. let.....	- 23 -
2. Výrazné vlivy na provoz a vývoj techniky	- 25 -
2.1 Ekonomický vliv v letecké dopravě	- 26 -
2.1.1 Ziskovost dopravců	- 28 -
2.1.2 Vliv vývoje ceny ropy	- 28 -
2.1.3 Nízkonákladová letecká společnost	- 32 -
2.2 Vliv technologického pokroku	- 35 -
2.2.1 Letecké materiály	- 35 -
2.2.2 Systémy řízení letadla	- 40 -
2.3 Další významné vlivy	- 41 -
2.3.1 Letecké únosy.....	- 42 -
2.3.2 Vliv leteckých katastrof	- 44 -
2.3.3 Přírodní katastrofy.....	- 47 -
Současné požadavky	- 51 -
3. Současné legislativní požadavky na letadlovou techniku pro leteckou přepravu.....	- 51 -
3.1 Legislativa L-16.....	- 51 -
3.2 Hluk	- 53 -
3.2.1 Aerodynamický hluk	- 53 -

3.2.2	Mechanický hluk	- 54 -
3.3	Emise	- 54 -
3.3.1	Znečištění v okolí letiště.....	- 56 -
3.3.2	Vypouštění paliva.....	- 57 -
3.4	Snižování hluku a emisí.....	- 57 -
3.4.1	Konstrukce a technologie	- 57 -
3.4.2	Provozní postupy.....	- 58 -
Budoucí vývoj	.....	- 60 -
4.	Budoucí vývoj dle IATA do roku 2050	- 60 -
4.1	Vývojová technologie	- 61 -
4.1.1	Aerodynamika	- 62 -
4.1.2	Komponenty motoru.....	- 64 -
4.1.3	Systémy	- 64 -
4.2	Revoluční technologie	- 64 -
4.2.1	Koncept samokřídla – Blended wing body	- 65 -
4.2.2	Koncept křídel podepřených vzpěrami – Strut-braced Wing	- 66 -
4.2.3	Koncept uzavřených křídel – Box-Wing.....	- 67 -
4.2.4	Koncept dvojitého tubusu – Double-bubble fuselage	- 67 -
4.2.5	Technologie využívající pokročilé materiály	- 68 -
4.2.6	Koncepty pohonů	- 69 -
4.2.6.1	Propfan rotor – Open rotor	- 69 -
4.2.6.2	Propulsive Fuselage Concept – Nasávání mezní vrstvy.....	- 70 -
4.2.6.3	Elektromotory.....	- 71 -

4.3	Budoucí prototypy letadel	- 72 -
4.3.1	MAVERIC	- 72 -
4.3.2	E-FAN X	- 74 -
4.3.3	STARC – ABL	- 74 -
4.3.4	WRIGHT 1	- 75 -
4.3.5	AURORA D8	- 76 -
4.3.6	N3-X	- 77 -
4.4	Možnosti alternativních paliv	- 77 -
4.4.1	Syntetická paliva	- 78 -
4.4.2	Obnovitelná paliva	- 78 -
4.4.2.1	Biopaliva	- 78 -
4.4.2.2	Deriváty alkoholu	- 79 -
4.4.3	Nemísitelná paliva	- 79 -
4.4.3.1	Vodík	- 80 -
5.	Statistické vyhodnocení	- 82 -
Závěr	.....	- 86 -
Použité informační zdroje	.....	- 86 -
Seznam použitých zkratk	.....	- 86 -
Přílohy	.....	- 97 -

ÚVOD

Letecká doprava jako taková nemá dlouhou historii. Odpradáвна člověka provázela touha poznat svět z ptačí perspektivy, jak lze poznat z mýtu o Daidalovi a Ikarovi, kteří se vznesli pomocí křídel vytvořených z vosku a peří. První zaznamenané vědecké teorie pocházejí z 15. století z pera italského renesančního umělce a vědce Leonarda da Vinci, který nakreslil návrhy padáku, vrtulníku a mnoha dalších vizionářských idejí. Prvním potvrzeným případem vzletnutí člověka je let balonu bratří Montgolfierů ze září 1783 ve Versailles. Následně začaly pokusy s nepohyblivým křídlem. Nejdříve ve formě kluzáků, jejichž nejslavnější průkopník je Otto Lilienthal. Postavil 18 různých modelů, s kterými létal ze svahu. Poté přišla myšlenka letadlo pohánět strojem. Nejdříve pomocí parního stroje, který nedosahoval ani zdaleka dostatečného výkonu pro vzlet. Nicméně s vynálezem zážehového motoru se člověk přiblížil opět o krok ke svému snu létat. Začaly pokusy s letadly vybavenými zážehovými motory. Velký rozkvět letectví začal v moment, kdy se letadlo bratří Wrightů poprvé vzneslo do vzduchu roku 1903. Tento první opravdový let trval pouze 12 sekund na vzdálenost 39 metrů. Od té doby uplynulo více než 100 let. Nicméně i za tuto relativně krátkou dobu stihlo letectví udělat velký pokrok vlivem technického vývoje, ale i vlivem různých událostí, které jej posunuly vpřed. Cílem této diplomové práce je shrnout tyto události a aspekty, které ovlivnily vývoj leteckých technologií a predikovat možný vývoj vzhledem k současnému dění. První část práce je věnována pokroku technických parametrů od 20. let 19. století po současnost a jednotlivým vlivům. Druhá část práce je věnována současným požadavkům na letecký provoz. Třetí část práce se zabývá strategiemi a teoriemi možného budoucího vývoje letectví.

MINULÝ VÝVOJ

1. VÝVOJ TECHNICKO-PROVOZNÍCH PARAMETRŮ

LETADEL PRO PŘEPRAVU CESTUJÍCÍCH

V této kapitole jsou uvedeny základní provozní parametry letounů v průběhu let z pohledu změn systémů pohonu a jsou zde porovnány energetické náročnosti letadel na 1 sedadlo a uletěný kilometr. Dále jsou zde rozebrány jednotlivé aspekty ovlivňující vývoj letectví a technologie a uvedeny některé konkrétní události.

Letadla můžeme rozdělit podle typu pohonu. V současnosti naprostá většina dopravních letounů využívá proudové motory, nicméně tomu předcházela dlouhá cesta pístových motorů. I když největšího rozvoje dosáhla letecká doprava až po 2. světové válce, její začátky lze spatřit mnohem dříve. Technologického pokroku dosaženého během 1. světové války se využilo i v civilní sféře a začala se rozvíjet civilní letecká doprava. Kromě přepravy vzducholodí se začala uplatňovat i přeprava pomocí motorových letadel těžších než vzduch. Větší poptávka po osobní letecké přepravě vedla ke vzniku leteckých společností, pravidelných linek i prvních mezinárodních dohod o civilním letectví.

Největší rozvoj letecké dopravy se stal v průběhu 2. světové války a v poválečném období. Během války došlo k velkému rozvoji letecké technologie, který se poté projevil také v civilní dopravě. Výrazně vzrostly přepravní výkony, prodloužily se dolety, zvyšovala se bezpečnost a spolehlivost. Navigační technologie začala využívat technologii radaru a zdokonalený systém ILS. Letecká doprava se stále více dostávala do běžného života lidí.

Měnila se i provozní oblast. Docházelo k sjednocování provozních postupů, rozdělení vzdušného prostoru na letové oblasti, koncové řízené oblasti, řízené okrsky letišť a vytvořila se mezinárodní síť letových cest. Pro zjednodušení mezinárodní spolupráce proběhla řada konferencí. První proběhla 18. ledna 1919, tzv. **Pařížská mírová konference**, jejímž výsledkem byla Úmluva o úpravě letectví. Tato Úmluva řešila otázky suverenity nad vzdušným prostorem, registrace letadel, licencování pilotů a provoz vojenských letadel. Také zřídila Mezinárodní komisi pro leteckou navigaci (International Commission for Air Navigation – ICAN), která byla 1. organizací řešící rozvoj mezinárodního civilního letectví a předchůdcem organizace ICAO.

Jedna z nejdůležitějších konferencí byla **Chicagská konference**, která proběhla 9. září 1944. Jejím cílem bylo reagovat na změny v letecké dopravě po 2. světové válce, v rozvoji letecké techniky a vytvořit legislativu zamezující případným konfliktům mezi jednotlivými státy. Výsledkem Chicagské konference bylo přijetí Úmluvy o mezinárodním civilním letectví (v platnosti od roku 1947), která kompletně nahradila Pařížskou úmluvu. Spolu s ní vešly v platnost i další dokumenty, hlavně Mezinárodní dohoda o letecké dopravě a Dohoda o tranzitu mezinárodních leteckých služeb. **Úmluva o mezinárodním civilním letectví** je rozdělena na dvě části. První část obsahuje ustanovení, která upravují vztahy mezi státy v oblasti mezinárodního

civilního letectví, určují, že každý stát má úplnou kontrolu nad vzdušným prostorem nad svým státním územím, pravidla létání, registrace letadel a jejich státní příslušnost, podmínky, jimž musejí letadla vyhovovat, požadavky na posádky letadel, definují zakázané oblasti, letištní poplatky a další normy. Druhá část dokumentu zřizuje **Mezinárodní organizaci pro civilní letectví** (International Civil Aviation Organisation – ICAO). Jejím cílem je bezpečný rozvoj mezinárodního letectví. Součástí úmluvy je také 19 annexů (příloh), které stanovují požadavky a postupy v jednotlivých oblastech letectví.

Další dva dokumenty (Mezinárodní dohoda o letecké dopravě a Dohoda o tranzitu mezinárodních leteckých služeb) zaručují úplnou suverenitu států nad svým vzdušným prostorem a určují základy pravidel pro zavedení volnějšího mezinárodního trhu v letecké dopravě. Dále určují pět letových svobod, které upravily legislativu pro aerolinie a daly jim právo vstupovat do letového prostoru jiného státu, přistávat na jeho území nebo nakládat či vykládat zboží a cestující za smluvních podmínek. Další čtyři svobody vznikly na základě praktických zkušeností z vedení linek a přípojů, ale nejsou právně určeny:

- první svoboda – právo letět přes území jiného stát bez přistání;
- druhá svoboda – právo přistát na území druhého státu z neobchodních důvodů;
- třetí svoboda – právo přepravy cestujících nebo služeb na území druhého státu;
- čtvrtá svoboda – právo přijmout cestující nebo zboží z druhého státu;
- pátá svoboda – právo vysadit nebo nabrat cestující či zboží na území prvního státu směřující do nebo z třetího státu;
- šestá svoboda – právo provozu letecké linky s mezipřistáním na vlastním území;
- sedmá svoboda – právo provozovat let mezi dvěma cizími státy;
- osmá svoboda – právo přepravovat cestující či náklad v druhém státě, i když let započal na území vlastního státu;
- devátá svoboda – právo provozování letu, který započal i končí na území druhého státu, aniž by započal na vlastním území.

Spolu s řadou dalších dohod přispěly k liberalizaci letecké dopravy, k bezpečnému a spolehlivému rozvoji letecké techniky, zajištění pravidelnosti letů a k zpřístupnění široké veřejnosti. [3, 4, 5]

1.1 Historie motorů

Letadla poháněná pístovými motory patří do nejstarší kategorie motorových letadel těžších než vzduch. Postupné zdokonalování konstrukce letadel, vývoj v oblasti motorů a vrtulí, to vše umožnilo růst výkonů a kapacity. Ze pracovaných tabulek a grafů v příloze lze vyčíst, že první letadla začala být využívána k přepravě cestujících po 1. světové válce, i když pouze ve formě prototypů a přestavěných bombardérů. Po 2. světové válce dopravní letouny s pístovými motory dosáhly svým možných limitů velikosti a výkonů. Dokázaly přepravit okolo 100 cestujících při cestovní rychlosti $450\text{--}600\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ s doletem 8 000 – 10 000 km. Zvyšování rychlosti nebylo již možné, neboť tah vrtule závisí na kombinaci jejích otáček, počtu, průměru a tvaru listů vrtule. Při přílišném počtu listů dochází ke vzájemnému vyrušování proudění vzduchu mezi sousedními listy,

což snižuje účinnost. Zvětšování průměru je vhodné až do okamžiku, kdy se obvodová rychlost na konci listů začne blížit rychlosti zvuku, při které vznikají rázové vlny snižující efektivitu.

S omezenou rychlostí let dlouhý 8 000 km trval okolo 15 hodin. Nepohodlí cestujících způsobeno vibracemi a hlukem pístových motorů bylo důvodem, proč koncem 50. let 20. století byly pístové motory nahrazeny proudovými na dlouhých, středních a poté i krátkých tratích. Dnes pístové motory nalezneme pouze v malých letadlech, sloužících pro přepravu malého počtu pasažérů. Na grafech (viz příloha graf č. 1-6) lze vidět skok v 50. - 60. letech v parametrech cestovní rychlosti, počtu přepravených osob, doletu ale i hmotnosti konstrukce letadla, velikosti a maximální vzletové hmotnosti.

Skok byl způsobený přechodem na proudová, nejdříve hlavně turbovrtulová letadla. Turbiovrtulová letadla se rozšířila dříveji oproti tryskovým, neboť měly mnohem více společného s konstrukcí pístových letadel a mohla využít jejich konstrukci. Docházelo dokonce i k přestavbám, kdy byly pístové motory nahrazeny turbovrtulovými. Příkladem je známá Dakota DC-3. Tento letoun byl zařazen do civilního provozu roku 1936, původně vybaven pístovými hvězdicovými motory firmy Pratt & Whitney. S kapacitou 21 pasažérů a doletem 1650 km dokázal jako první komfortně a výnosně přepravovat cestující. DC-3 (obr. č. 1) také proslula svojí spolehlivostí (asi 172 bylo roku 2020 stále registrovaných v provozu z 11 000 vyrobených), není proto divu, že byly pokusy osadit Dakotu motory turbovrtulovými už na přelomu 40./50. let. Doopravdy se ale uplatnilo až u dalších typů, nejznámější a nejrozšířenější turbovrtulovou verzí Dakoty se stal Basler BT-67 (zařazen do provozu 1990). [78]



Obr. 1 – DC-3 [78]

Tah turbovrtulových motorů je naprostou většinou zajištěn vrtulí a asi 5 % připadá na kinetickou energii plynů. Použití vrtule sice přináší podobná omezení jako v případě pístových motorů, nicméně hlavní výhodou byl podstatný nárůst výkonu, snížení měrné spotřeby paliva a zvýšení spolehlivosti. Vyšší výkon motorů umožnil zvětšit konstrukci letadla a zvýšit počet přepravených pasažérů. Cestovní rychlost žádný velký nárůst nezaznamenala, ale došlo ke snížení vibrací a zvýšení komfortu cestujících. Měrná spotřeba paliva je podrobněji rozebrána v kapitole 1.2., kde je porovnávána spotřeba posledních pístových letadel s nastupujícími proudovými až po současnost. Dnešní turbopohony jsou většinou osázeny šestilistými vrtulemi, jejichž listy mají počítačově optimalizovaný aerodynamický tvar pro vyšší tah a nižší hlučnost. Často jsou také vybaveny systémy aktivní redukce hluku v kabině pasažérů. Tento systém reproduktorů funguje na principu vyrušování zvukového vlnění od zvuku motorů. Reprodutory vysílají zvuk o stejné frekvenci a amplitudě jako zvuk motorů, ovšem s určitým fázovým posunem, který zapříčiní, že se oba zvuky částečně vyruší. I tak je hluk stále výrazný a působí nepříjemně na cestující. Běžně se proto délka letů pohybuje okolo 1,5 hodiny, aby se pasažéři cítili pohodlně.

Ale ani období turbovrtulových letadel netrvalo dlouho. Během 60. let byly nahrazeny tryskovými letadly na dlouhých a středních tratích. Turbivrtulová letadla se udržela v provozu dodnes na krátkých tratích. Výhody oproti tryskovým letadlům:

- konstrukčně jednodušší – menší náročnost na prostředky nutné k údržbě a provozu;
- menší nároky na vzletové a přistávací dráhy – lze je provozovat i na menších a méně vybavených regionálních letištích;
- nižší náklady – turbivrtulová letadla mají menší spotřebu paliva, nižší pořizovací cenu, menší náklady na údržbu a opravy;
- trysková letadla se nevyplácí na krátkých tratích – časová úspora tryskových letadel činí asi 25 % a na trati dlouhé 600 km by reálný rozdíl činil asi 20 minut.

Trysková letadla využívají k vyvolání tahu proudové nebo dvouproudé motory. Motor pracuje na principu Newtonova zákona akce a reakce. Vstupní část motoru nasává vzduch a za pomoci kompresoru jej stlačuje. Vzduch se tím zahřívá a takto upravený putuje do spalovací komory, kde je k němu vstřikováváno palivo. Zážehnutím směsi se uvolňuje tepelná energie a horké plyny, které vycházejí ze spalovací komory, roztáčejí turbínu umístěnou v zadní části motoru, která přes hřídel vedoucí osou motoru pohání kompresor. Proud spalín o vysokém tlaku a teplotě, který vychází z výstupních trysek, působí opačnou silou a přeměňuje tepelnou energii na kinetickou.

Trysková letadla se vyznačují celou řadou nesporných výhod (cestovní rychlost, nižší hlučnost a vibrace), ale trpí také mnohými nedostatky. První letouny v 40. letech se vyznačovaly poměrně vysokou spotřebou pohonných hmot, a navíc pracovaly při vysokých provozních teplotách. Vyžadovaly tak kvalitnější komponenty, což vedlo ke zvýšení výrobní ceny. Tato skutečnost zapříčinila, že proudová letadla se dostala do civilního letectví až koncem 50. let 20. století. Prvním tryskovým dopravním letadlem se stal britský de Havilland Comet, který byl zařazen do provozu roku 1952.

V průběhu let 1953–1954 se stala série nehod letounu typu Comet, způsobená únavovými trhlinami v rozích původních obdélníkových oken. Design trupu letounu navazoval na dosavadní vrtulová letadla a Comet létal o polovinu rychleji a v podstatně větší výšce kolem 13 000 metrů než dosavadní letadla, což zapříčinilo výrazné urychlení únavového namáhání, jehož účinky nebyly v té době prozkoumány. Všechna letadla typu Comet byla uzemněna a do provozu se vrátila až přepracovaná verze Comet 4 v září 1958, kdy již byl 2 roky v provozu sovětský Tupolev Tu-104 a k nasazení do provozu se chystala americká letadla Boeing 707, Douglas DC-8 a francouzská Caravelle. Všechny tyto nové letouny již ve své konstrukci využily nové poznatky o únavovém namáhání a využívaly upraveného designu. Svým designem daly základ standardům, které se dodržují dodnes.

Během 60. let došlo k výraznému rozmachu letecké dopravy, kdy díky technologickému pokroku, značné spolehlivosti a rychlosti, se letecká doprava stala přístupnou široké veřejnosti. Letadla s maximální kapacitou okolo 200 pasažérů přestávala uspokojovat poptávku, a proto se hlavní světoví výrobci letadel zaměřili na tzv. velkokapacitní letadla, schopná přepravit najednou 400–500 cestujících. Tyto velkokapacitní letouny využívaly k pohonu dvouproudé motory (dmychadlové motory) s vysokým obtokovým poměrem. Jedním z prvních, který vstoupil do provozu roku 1969, byl čtyřmotorový Boening 747 s kapacitou až 500 cestujících. Spolu se zvýšením kapacity došlo i k řadě provozních změn. Bylo třeba urychlit nástup a výstup velkého množství cestujících, proto byly zavedeny nástupní mosty spojující letadlo a letištní terminál. Bylo třeba připravit letištní infrastruktura pro velké množství lidí, pokročilé navigační prostředky pro zvýšenou hustotu dopravy na letišti, začaly vznikat rezervační systémy pro naplnění kapacit. Z těchto rezervačních systémů se později vyvinuly dnešní globální distribuční systémy (Amadeus, Galileo, Worldspan, Sabre), které umožňují automatizované rezervace a transakce mezi prodejci a agenturami, které poskytují služby v cestovním ruchu.

Od 80. let po současnost naprosté většině letecké dopravy dominují letadla vybavená dvouproudovými motory s vysokým obtokovým poměrem. Nejvýraznější změnou v systému pohonů v tomto období byl přechod z čtyřmotorových letadel na dvoumotorové na dlouhých a středních tratích. Při provozu je nutné splňovat požadavky, aby letadlo bylo schopné při vysazení jednoho motoru doletět bez problémů k nejbližšímu letišti. U třímotorových nebo čtyřmotorových porucha jednoho motoru znamená ztrátu pouze části tahu, zatímco u dvoumotorových znamená ztrátu půlky tahu, což se projeví ztrátou výšky a rychlosti. S pokrokem technologií rostla spolehlivost motorů a riziko výpadku motorů klesalo. Nastupující nová výkonnější generace dvoumotorových letadel (Boeing 757, Airbus 310) s úspornějším provozem proti čtyřmotorovým letadlům postupně vytlačila původní letadla na dálkových linkách. Tato změna si vyžádala vytvoření nových pravidel ETOPS (Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards) pro provoz na dlouhých tratích. Podle ETOPS bylo umožněno konkrétnímu typu letadla provozovanému konkrétním dopravcem na základě prokázané spolehlivosti motorů a schválených postupů pro případ vysazení jednoho z nich létat nad neobydlenými oblastmi tak, že letadlo se v žádném okamžiku letu nevzdálí od nejbližšího z vhodných a provozuschopných letišť

v okolí celé trati letu na větší vzdálenost, než odpovídá schválené maximální době letu v minutách dle příslušného povolení ETOPS-90 (maximálně 90 minut od nejbližšího letiště).

Dnešní moderní letadla létají standardně podle ETOPS-180 (maximálně 180 minut od nejbližšího letiště) a některé typy letadel dosahují certifikací ETOPS-330 i více. Zvyšující se ETOPS standardy, spolu se zvyšující se spolehlivostí, jednodušší a levnější údržbě i provozu, znamenaly porážku čtyřmotorových letadel, které dnes již tvoří spíše výjimky, jako například letadla obřího typu A380 nebo B747. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,]

1.2 Analýza vývoje energetické náročnosti letadel přepočtené na 1 sedadlo a uletěný kilometr od 50. let

Při vývoji letadel se pohlíží na mnoho faktorů, např.: bezpečnost, provozní parametry, provozní náklad, aj. Jeden z faktorů ovlivňující trh a výrobce letadel je efektivní využití paliva. Spolu s tím v posledních letech roste i zájem o snižování vypouštěných emisních plynů. V 90. letech letecký provoz produkoval 3,5 % z celosvětové produkce skleníkových plynů. Pro určení energetické náročnosti letadel jsou nejdůležitější tyto parametry:

- aerodynamická účinnost – důležitý je poměr vztlakové a odporové síly;
- váhový poměr – hmotnost prázdného letounu (Operating Empty Weight – OEW) a maximální vzletové hmotnosti (Maximum Take Off Weight – MTOW);
- kapacita sedadel;
- účinnost motorů.

OEW – Hmotnost konstrukce letadla včetně posádky, všech kapalin potřebných pro provoz, jako je motorový olej, chladicí kapalina motoru, voda, nepoužitelné palivo a všechny položky a vybavení potřebné pro let, s výjimkou použitelného paliva a užitečného zatížení.

MTOW – Maximální povolená hmotnost letadla pro vzlet.

MZFW – Maximum Zero Fuel Weight – Maximální povolená hmotnost před naložením použitelného paliva a dalších specifikovatelných použitelných látek (vstřikovací kapalina do motoru a dalších spotřebních pohonných látek).

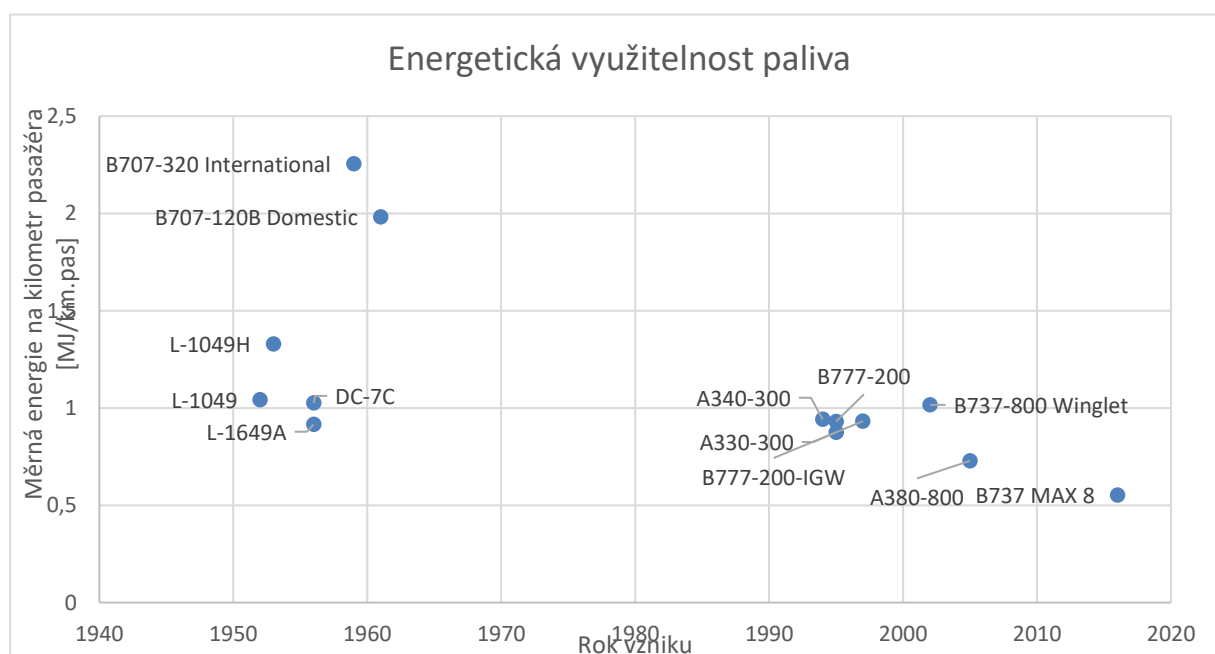
Z analýz vyplynulo, že při nástupu proudových motorů měly mnohem horší účinnost než stávající pístové, které měly menší spotřebu, větší spolehlivost, ale menší letové rychlosti a dolet. Postupným vývojem mezi roky 1960 a 2000 se účinnost proudových letounů výrazně zlepšila, z velké části díky vylepšení efektivnosti proudových motorů, dále také díky zlepšení aerodynamických vlastností a zvýšení kapacity sedadel. Pro porovnání jsou vybrána čtyři letadla s pístovými motory z 50. let a proudová letadla z přelomu 50./60. let až do současnosti.

Model	Rok	OEW [kg]	MZFW [kg]	MTOW [kg]	S [km]	K [ks]	E_{kmp} [MJ · km ⁻¹ · ks ⁻¹]
L-1049	1952	31 326	44 719	54 480	3 943	106	1,043
L-1049H	1953	31 789	49 681	62 368	4 634	92	1,329
DC-7C	1956	35 785	46 030	64 865	7 458	110	1,025
L-1649A	1956	38 675	52 500	70 700	8 704	102	0,915
B707-320 International	1959	64 600	83 185	141 500	6 108	189	2,255
B707-120B Domestic	1961	57 600	77 200	117 000	5 152	174	1,982
A340-300	1994	129 300	178 000	275 000	10 458	440	0,941
A330-300	1995	122 200	173 000	230 000	6 610	440	0,875
B777-200	1995	133 060	190 500	242 630	5 684	440	0,931
B777-200	1997	135 600	195 000	286 900	10 001	440	0,932
B737-800 Winglet	2002	41 412	62 732	79 016	3 889	184	1,016
A380-800	2005	277 145	369 000	575 000	14 800	853	0,729
B737 MAX 8	2016	45 070	65 952	82 191	6 570	200	0,552

Tab. 1 – Seznam letadel [9]

Z těchto dat lze určit měrnou energii paliva na kilometr a pasažéra E_{kmp} pomocí podílu hmotnosti paliva a násobku počtu pasažérů K a doletu letounu S . Hmotnost paliva se určí jako rozdíl max. vzletové hmotnosti $MTOW$ a max. hmotnosti letounu bez paliva $MZFW$. Energetický obsah paliva E_{pal} uvažujeme $44,65 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Z vypočtených hodnot se vytvoří graf závislosti měrné energie v průběhu let.

$$E_{kmp} = E_{pal} * \frac{MTOW - MZFW}{S * K} \quad (1.1)$$



Graf 1. – Závislost měrné energie v průběhu let

Z grafu č. 1 lze vidět, že pístová letadla v 50. letech měla výrazně lepší energetickou využitelnost paliva než nastupující proudová. V 70. letech, kdy došlo k ropné krizi a cena leteckého paliva začala růst, se zvýšil zájem o využitelnost paliva. V 80. letech se původní rozdíl mezi účinností pístových a proudových letadel začínal srovnávat a nyní proudová dosahují nižší spotřeby paliva a blíží se k možné dolní hranici energetické využitelnosti paliva pro proudové motory. [9]

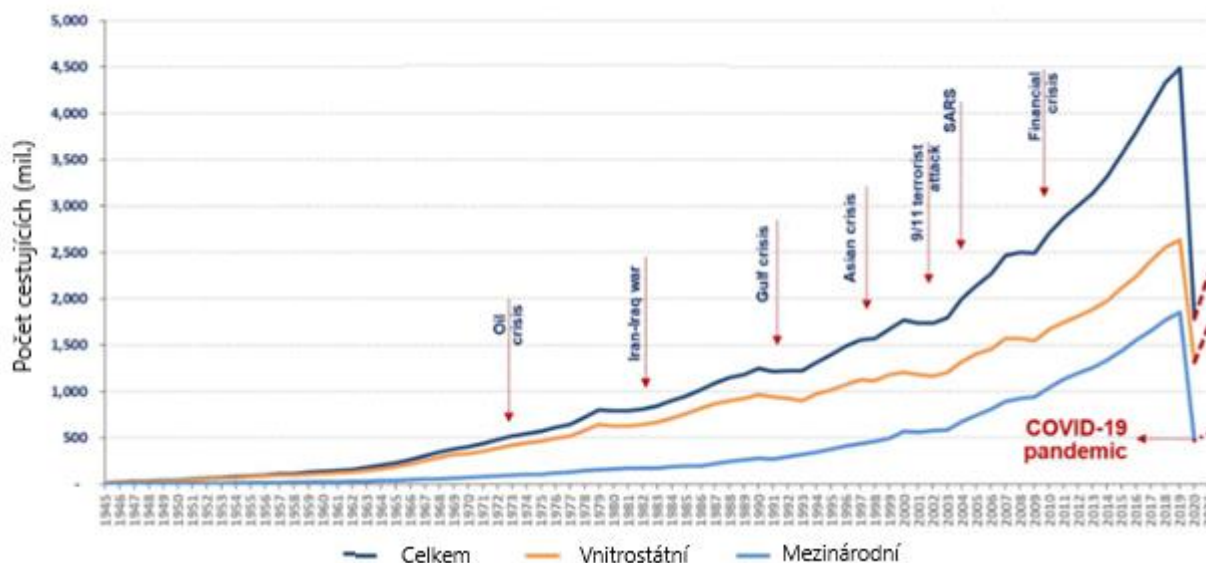
2. VÝRAZNÉ VLIVY NA PROVOZ A VÝVOJ TECHNIKY

V následujících kapitolách (2.1–2.3) je rozebráno, jak je letectví ovlivněno technologickým a ekonomickým vývojem, celosvětovými krizemi nebo mimořádnými událostmi. Mezi tyto události se řadí přírodní pohromy, teroristické činy, riziko šíření nakažlivých chorob, letecké katastrofy ad. Všechny tyto jevy mohou způsobit hmotné škody, ohrozit životy cestujících, posádky či třetí strany. Samotná letecká technologie se na tyto případy nedá připravit, proto se pro tyto jevy upravují postupy řízení letového provozu, systém kontroly cestujících a připravuje se letištní

pohotovostní plán, který má za úkol v případě takovéto pohromy koordinovat postup řízení letového provozu, záchranných služeb a všech zúčastněných stran a minimalizovat dopad na letištní provoz.

2.1 Ekonomický vliv v letecké dopravě

Letecká doprava je nejmladší ze všech druhů dopravy a v posledních desetiletích zaznamenala výrazný nárůst v přepravních výkonech přepravy díky své spolehlivosti, bezpečnosti a rychlosti. Dle statistik zaznamenala meziroční nárůst o 3,5 % mezi roky 2018 a 2019 v počtu přepravených pasažérů. V současné době dochází k prudkému snižování zájmu o leteckou přepravu v důsledku šíření nemoci COVID-19. Během roku 2020 bylo přepraveno o 2 699 mil. pasažérů méně, což činí asi 60 % propad oproti roku 2019. Dopravci nabízeli o 50 % méně letenek a ztráty příjmů dosáhly na 371 mld. USD. Odhady pro rok 2021 se pohybují okolo 1,9 - 2,4 mld. méně přepravených pasažérů oproti roku 2019 a předpokládané ztráty jsou 282-343 mld. USD. Současná krize měla na letectví mnohem větší dopad než jakákoliv předchozí a je obtížné odhadnout, kdy se letectví vrátí do stavu před rokem 2020. Na grafu č. 2 je porovnání vlivů různých krizí na počet přepravených pasažérů. Nejvýrazněji se podepsaly teroristické útoky 11. září a finanční krize.



Graf 2. – Počet přepravených pasažérů 1945-2021 [10]

I přes tento velký výkyv lze předpokládat, že se časem stav vrátí do normálu a zájem o leteckou dopravu začne opět růst. Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují růst a pokles letecké dopravy. Lze je rozdělit na sociální, ekonomické, demografické, možné kapacity a další. Tyto faktory ovlivňují jak spotřebitele, tak poskytovatele služeb a formují trh pomocí nabídky a poptávky. Poptávka je množství zboží nebo služeb, které je kupující (zákazník) ochoten pořídit za určitou cenu, v určitý čas a na určitém místě. Nabídka oproti tomu je souhrn nabízených statků (služeb) na trhu. Mezi faktory významně působící na trh řadíme sociální, ekonomické, demografické a jiné.

Sociální faktory

- Obecně jsou sociální faktory silně ovlivněné demografickými a ekonomickými faktory a je těžké je proto rozlišit. Můžeme sem zařadit vzdělanost, zájem o cestování, životní styl, dopady na životní prostředí, tlak a kultura společnosti.

Ekonomické faktory

- Cena – Jedním z nejdůležitějších ekonomických faktorů, který působí na poptávku je cena dopravy. Nižší cena letenek vede k většímu zájmu o cestování a k růstu letecké dopravy. Asi nejlepším příkladem jsou nízkonákladoví dopravci, kteří provádí svou činnost se zaměřením na co nejmenší výdaje za provozní náklady. Obvykle nízkonákladové společnosti omezují poskytované služby na palubě letounu nebo je poskytují za poplatek a dále si například účtují další poplatky za zavazadla. Cenu letu ovlivňují mzdy personálu, cena leteckých pohonných hmot, poplatky a další náklady na provoz letadlového parku. Cena pohonných hmot může být značně kolísavá a odvíjí se od současného trhu s ropou (viz kap. 2.1.2). Při provozu letecké dopravy je třeba uhradit řadu poplatků, které se promítnou do konečné ceny. Mezi poplatky patří přiblížovací poplatek, přistávací poplatek, hlukový poplatek, emisní poplatek, letištní poplatek ale třeba i pojištění letadel či cestujících.
- Hrubý domácí produkt (HDP) – HDP je finální celková peněžní hodnota statků a služeb vytvořená za dané období na určitém území. Tento ukazatel se používá v makroekonomii pro určování výkonnosti ekonomiky států. Časovým obdobím bývá obvykle rok. S vyšší prosperitou roste i poptávka po letecké dopravě. To platí i obráceně, kdy cestující, nejčastěji turisti, přispívají ke zvyšování prosperity státu.
- Liberalizace – Mezinárodní letecká doprava se řídí souborem pravidel, bilaterálními dohodami. Tento systém umožňuje volný pohyb cestujících a nákladu. Stanovují pravidla pro obchodní dimenzi leteckých vztahů mezi danými dvěma zeměmi. Obsah bilaterální dohody je možné obecně rozdělit do následujících pěti prvků – přístup k trhu, udělení svobod vzduchu, kapacitní pravidla, pravidla cenotvorby a ostatní obchodní pravidla. Podobně existují smlouvy multilaterální, které platí pro více zemí, příkladem je dohoda států EU a USA. Postupná liberalizace letecké dopravy začala v USA na konci 70. let minulého století a postupně se rozšířila do celého světa. Vytvořila tak konkurenční prostředí a umožnila vznik nízkonákladových dopravců. Na jednu stranu tak klesá regulace v oblasti obchodu, na stranu druhou z bezpečnostních důvodů roste regulace v provozních, technických, bezpečnostních a dalších oblastech.
- Obchodní model – Zde proti sobě stojí tzv. klasičtí a nízkonákladoví dopravci (viz kap. 2.1.3).

Demografický faktor

- Spolu s rostoucím počtem obyvatel a postupující globalizací roste i zájem lidí o cestování. Prodlužující se produktivní věk (15-59) a zvětšující se střední třída také zvyšuje počet cestujících.

Omezená kapacita

- Nabídka letů neustále roste, liší se dle vyspělosti trhu. Ve vyspělých zemích je růst letecké dopravy takřka na maximum a předpokládaný růst je do 5 % ročně, zatímco v rozvojových zemích jako Indie, Latinská Amerika či africké státy se předpokládá rychlý růst. Během roku 2019 se uskutečnilo přes 68 mil. letů celosvětově. S takovým vytížením se kapacita letišť i kapacita vzdušného prostoru značně zaplňuje a vyspělé země tak ztrácí schopnost uspokojovat poptávku, aniž by zároveň neztrácely dostatečnou úroveň bezpečnosti.

Náhodné vlivy

- Mezi náhodné vlivy můžeme řadit katastrofické události, jako jsou letecké nehody, přírodní katastrofy, meteorologické jevy, teroristické útoky či stávky personálu. Toto vše může negativně ovlivnit jak poptávku, tak nabídku a způsobit pokles v letecké dopravě. Některé tyto jevy jsou popsány v kap. 2.3. [12, 17]

2.1.1 Ziskovost dopravců

Ziskovost letecké dopravy je poněkud nejistá, neboť ji silně ovlivňuje ekonomický a politický vývoj ve světě. Z dlouhodobého hlediska je ziskovost nízká a cyklická. Od počátku osmdesátých let minulého století se ziskovost pohybuje v opakujících se zhruba jedenáctiletých cyklech, které bývají narušeny ekonomickým a politickým vývojem ve světě. Na grafu č. 2 lze identifikovat některé krize, které výrazně ovlivnily leteckou dopravu a zapříčinily propady. Některé případy jsou: v roce 1975 (první ropný šok), v roce 1982 (druhý ropný šok, krizové politické období), v roce 1991 (americká hospodářská recese), v roce 2001 (teroristický útok 11. září), epidemie SARS v roce 2003 aj. Dopravci jsou proto nuceni hledat cesty, jak ziskovost zvyšovat pomocí zvyšování výnosů i snižování nákladů a přizpůsobovat se vnějším vlivům.

Jakákoli z těchto krizí měla výrazný dopad na leteckou dopravu, došlo hlavně k prudkému poklesu poptávky vlivem napjaté mezinárodní situace, na kterou je letecká doprava velmi citlivá, a dramatickému zvýšení ceny paliva. Některé letecké společnosti dokázaly projít krizovými obdobími s minimálními dopady nebo dokonce se ziskem, nicméně uvedené krize zasáhly většinu leteckých dopravců. Je zajímavé, že více postižení bývají v podobných situacích velcí dopravci, obzvláště v krizích spojených s bezpečností provozu. Souvisí to s vnímáním vyššího rizika hrozby teroristických útoků či obav o bezpečnost ze strany cestujících právě u známějších leteckých společností, kde případný útok či letecká nehoda vyvolala beze sporu větší ohlas a publicitu. [12, 17]

2.1.2 Vliv vývoje ceny ropy

Ropa je viskózní kapalina, která má široké využití. Používá se jako palivo, mazivo, elektrická izolace a své využití má i v potravinářském průmyslu. Slouží k výrobě benzínu, leteckých paliv,

plastů a mnoha dalších produktů. Existuje mnoho typů ropy, liší se podle složení a jednotlivé druhy mohou obsahovat i více než sto různých typů uhlovodíků. Poměry, ve kterých se určité složky nacházejí v dané ropě, určují její vlastnosti a charakteristiky. Důležitými ukazateli je hustota ropy, ropných frakcí, které se často vyjadřují ve stupních API (American Petroleum Institute), a obsah síry. Vysoký obsah síry je často nežádoucí a pro jeho odstranění jsou v rafinačním procesu nutné další operace, což zvyšuje konečnou cenu. Proto jsou také lehké surové ropy dražší než těžké kyselé ropy.

Ačkoli poptávka po ropě roste v důsledku vyšší poptávky po naftě, cena je často ovlivněna současným politickým děním. Poptávka po ropě roste celá desetiletí, přesto ale cena ropy nedosahuje svých historicky nejvyšších úrovní, což je zapříčiněno nejen současnou krizí, ale také obratem, kdy se průmysl v posledních letech snaží více zaměřit na udržitelný rozvoj a alternativní zdroje energie. Z grafu č. 3 lze vyčíst, že ropa dosáhla své maximální hodnoty v roce 1981 během druhého ropného šoku, kdy se cena vyšplhala na 35,75 amerických dolarů za barel (119,59 USD přepočteno na dnešní cenu s vlivem inflace).

Ekonomické výkyvy

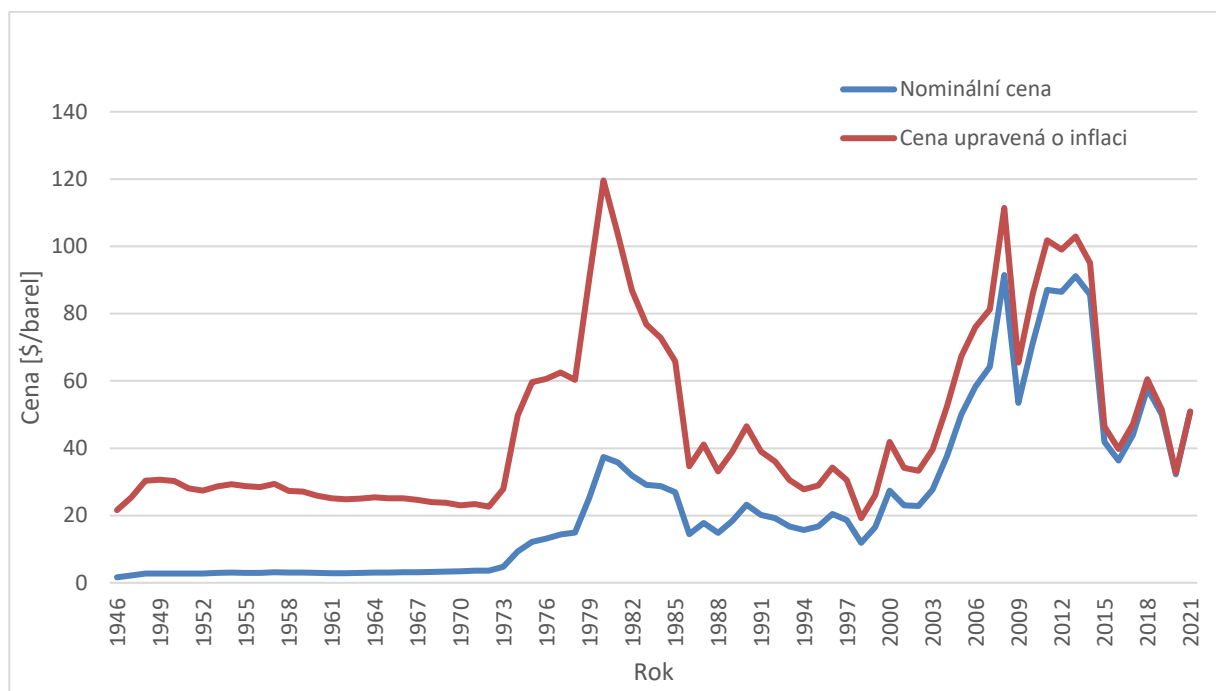
- **První ropný šok** – Prvním ropným šokem je označováno zvýšení cen ropy, ke kterému došlo v roce 1973. Jedním z hlavních důvodů razantního zvýšení cen byla nespokojenost vývozců ropy s příliš nízkými ropnými zisky. Ve snaze o jejich zvýšení usilovali o zdvojnásobení cen ropy na úroveň 5 USD za barel. OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries – Organizace zemí vyvážejících ropu) záměrně omezila svou výrobu ropy asi o 5 %. Zároveň vyhlásila embargo – čili zákaz vývozu ropy do zemí podporující Izrael během Jomkipurské války (Spojené státy americké a Nizozemí). Ve výsledku průměrná cena ropy vzrostla z 3,29 USD na 11,58 USD.
- **Druhý ropný šok** – K druhému ropnému šoku došlo v roce 1979 a hlavní příčinou byla potická změna režimu. Roku 1979 vypukla revoluce v Íránu a následovala irácko-iránská válka. Nový režim začal vyvážet méně ropy než doposud (o 2 až 2,5 milionů barelů denně). Další země OPEC kvůli tomu zvýšily těžbu a ve výsledku došlo jen asi o 4 % snížení celosvětové produkce ropy. Revoluce měla za následek pouze krátkodobý pokles produkce, ale kvůli rozsáhlé panice cena ropy vzrostla mnohem více, než odpovídalo vážnosti situace. Výraznějším impulsem pro změnu ceny byla invaze Iráku na území sousedního státu roku 1980. Saddám Husajn využil zhroucení režimu v Íránu, aby si nárokoval území obývané iráckou menšinou, což bylo i mimochodem území s bohatým nalezištěm ropy. Válka trvala 8 let, poškodila obě ekonomiky a tím výrazně snížila těžbu (asi o 11 %) v obou zemích. Během této doby cena dosáhla svého historického maxima. Celosvětová produkce ropy dosáhla na původní úroveň před druhým ropným šokem až počátkem 90. let. Oba tyto šoky měly dopad celosvětový a v reakci na pokles dovozu se zvýšila snaha o snížení závislosti na zemích OPEC, hledání alternativních zdrojů a zásobování ropy.
- **Válka v Perském zálivu** – Ke krátkodobému navýšení ceny ropy došlo také v roce 1990, kdy vyvrcholilo napětí mezi Irákem a Kuvajtem. V důsledku invaze bylo OSN (Organizace spojených národů) uvaleny sankce a embargo na Írák. V jejich důsledku

byla produkce výrazně snížena. Tento propad nicméně potlačily státy OPEC zvýšením produkce, čímž nakonec začaly snižovat cenu od roku 1991.

- **Asijská krize** – V polovině 90. let 20. století došlo na asijském trhu k poklesu hrubého domácího produktu, což vedlo ke snížení poptávky ropy, a zároveň státy OPEC zvýšily produkci ropy. To vedlo k nasycení trhu a poptávka nestačila na nabídku, což vedlo k prudkému snižování ceny ropy. Ropa tak roku 1998 dosáhla dlouholetého minima 11,91 USD za barel a růst opět začala se zotavováním ekonomiky.
- **Teroristické útoky 11. září** – Nejznámější teroristický útok spáchaný v letectví se udál 11. září 2001, kdy devatenáctičlenná teroristická skupina napojená na militantní islámskou organizaci Al – Káida, unesla 4 letadla typu Boeing 757 a 767 společností American Airlines a United Airlines. Dvě letadla narazila do věží Světového obchodního centra v New Yorku. Kvůli nárazu a následnému požáru se obě věže zřítily. Třetí letadlo narazilo do Pentagonu, sídla ministerstva obrany USA. Čtvrté letadlo se zřítilo po souboji mezi teroristy a pasažéry letu u města Shankville. Útoky měly na svědomí více než 3000 mrtvých a velké množství zraněných. Cena ropy v důsledku útoků nejdříve výrazně klesly kvůli obavám z poklesu poptávky po ropě. Během roku 2002 ale začala cena ropy výrazně vzrůstat, neboť státy OPEC snížily produkci ropy. Během dalších let růst pokračoval kvůli stoupajícímu napětí na Blízkém východě.
- **SARS** – Ekonomické důsledky této pandemie byly mnohem větší, než by se zdálo z počtu 800 obětí. Ekonomické ztráty způsobené Číně, Singapuru, Hongkongu a Kanadě za několik týdnů trvání epidemie dosahovaly mnoha miliard dolarů. Během roku 2003 WHO poprvé v historii vydala doporučení necestovat do zemí postižených nákazou, což mělo důsledky na turistiku a hospodářství těchto zemí. I když tedy nedošlo k výraznějšímu poklesu poptávky ropy, došlo ke snížení zájmu o cestování do těchto zemí.
- **Světová finanční krize** – Též nazývaná Velká recese je období ekonomického poklesu na světových trzích, které trvalo mezi roky 2008 až 2015. Světová finanční krize byla důsledkem americké krize na trhu s hypotékami. Během srpna 2007 nastal finanční propad burzovních trhů v USA. O přesných příčinách se ekonomové a politici dodnes přou, nicméně je jisté, že k ní přispěla takzvaná realitní bublina. Z důvodu snížení úrokových sazeb totiž počátkem milénia prudce vzrostl počet prodaných domů a tento nárůst, zjednodušeně řečeno, neodpovídal síle tehdejší americké ekonomiky. V důsledku toho se celá řada bank dostala do finančních problémů a byla nuceny odepsat stovky miliard dolarů z nakoupených dluhopisů. Kvůli propojení světových finančních trhů a ekonomiky obecně se pak krize z USA přelila i do dalších částí světa. Významnou roli sehrála rovněž vysoká cena ropy v první polovině roku 2008, která vedla k poklesu reálného HDP a zvedla spotřebitelské ceny. Během krize se akciové indexy propadly o přibližně 50 %, ropu nevyjímaje. Cena se tak během roku 2008 propadla ze svého maxima (111,39 USD za barel) na cenu 53,48 USD za barel. Poté cena zase začala prudce růst, aby se až během roku 2011 ustálila. Krize a prudké výkyvy ceny paliva vedly k oslabení zájmu o leteckou přepravu a letečtí dopravci se ocitli ve ztrátě.
- **Břidlicová revoluce** – Během let 2012 až 2015 se pohyb cen ustálil přibližně na 100 USD za barel. Tato relativně vysoká cena způsobila, že pro americký trh začalo být výhodné produkovat břidlicovou ropu. Vhodné pro těžbu této ropy jsou povrchové

doly. Avšak uvedený způsob je obrovskou ekologickou zátěží pro životní prostředí. Také zpracování paliva je finančně náročné, ale kvůli vysoké ceně ropy a pokročilejším metodám těžby se tento způsob vyplácel. Zatím nejvýznamnější objevené zásoby ropných písků se nacházejí na území Kanady a Venezuely. Objevilo se mnoho menších amerických producentů a produkce břidlicové ropy začala rychle růst. Tento nástup nové konkurence vedl členy OPEC ke zvýšené těžbě ropy. Zvýšená nabídka na trhu vedla ke snižování ceny a během roku 2016 se cena dostala pod 40 USD za barel. Nicméně se velké ropné společnosti přepočítaly, producenti břidlicové ropy vyvinuli levnější a efektivnější postupy těžby a nyní dokážou ziskově fungovat i při nižší ceně. Pro tuto formu extrakce ropy je typické, že produkce může být rychle zvýšena, což při těžbě hlubinné ropy nelze. Producenti břidlicové ropy mohou proto rychleji reagovat na pohyb ceny ropy. Amerika již vyprodukuje více než 12 milionů barelů ropy denně, což je úroveň, která nebyla pozorována od počátku sedmdesátých let. Podle IEA (International Energy Agency – Mezinárodní agentura pro energii) produkce nadále výrazně roste a USA nedávno překonaly těžbu ropy v Saúdské Arábii a Rusku. Výsledkem této silné konkurence byla relativně stabilní cena okolo 50 USD za barel a výrazné výkyvy byly nepravděpodobné až do pandemické krize COVID-19. Z této relativně nízké ceny letecké společnosti mohly těžit, neboť se cena paliva do té doby výrazně promítala do přímých nákladů a stoupala k 40 %. Snížením ceny paliva došlo ke snížení nákladů dopravy a zvýšení zisků aerolinií.

- **COVID - 19** – Kvůli nákaze poklesla denní poptávka po ropě na celém světě zhruba o 2,5 milionu barelů během začátku roku 2020. Tento pokles těžce dopadl na trh s ropou a během dubna prudce klesla poptávka a cena klesla na své historické minimum, na hranici 30 USD. Došlo k přeplnění skladovacích kapacit a největší producenti země OPEC a Rusko vyjednali snížení produkce, většina členů OPEC je prakticky závislá na příjmech z ropy. Také pro Rusko je pokles ceny ropy těžkou finanční ranou. Američtí těžaři byli zasaženi nejvíce, neboť náklady na těžbu jsou vysoké a cena na trhu nestačila na pokrytí. Nicméně toto období netrvalo dlouho a na konci dubna začala cena ropy opět růst. Na konci roku 2020 se cena dostala na 45 USD za barel. V současnosti se ropa obchoduje za ceny, za které se obchodovala těsně před krizí, poptávka se neustále zvedá, ale zdaleka není na úrovni jako před koronavirovou krizí. Nicméně tento propad ceny ropy neměl žádný výrazný vliv na leteckou dopravu. I když by letecké aerolinie měly snížené náklady za sníženou cenu paliva, tak kvůli probíhající pandemii byla většina letů zrušena a letadla usazena na zem. V současné době není možné ještě učinit konečné závěry týkající se současné probíhající krize, ale z dostupných informací o vývoji z předešlých měsíců a z krátkodobých ukazatelů lze prohlásit, že se jedná o nejhorší krizi v dějinách civilní letecké dopravy.



Graf 3. – Vývoj ceny ropy 1946-2021 [11]

Cena ropy a tím i cena leteckého paliva je nestálá a má na leteckou dopravu výrazný vliv. Aerolinie jsou nuceny hledat nová opatření, aby snížily dopady výkyvů a vyhnuly se ztrátám. I když se se vstupem břidlicové ropy trh relativně ustálil na příznivé hladině, stále může být výrazně narušen. Proto se letečtí dopravci neustále snaží zavádět nové technologické inovace, které přispívají ke snižování spotřeby paliva. Aby se zabránilo dopadům kolísání ceny paliva, často dopravci nasazují tzv. **hedgingový program**. Hedging znamená zajištění stálé ceny pohonných hmot po určitou dobu, za určené množství a za úplatu. Dopravci se tak chrání před náhlými ztrátami z rostoucích cen, na druhou stranu také neumožňují náhlý zisk z poklesu ceny. Někteří dopravci volí tuto jistější strategii, neboť cena paliva je nejvíce volatilním (proměnlivým) prvkem nákladů provozu. Mnoho dopravců na tuto strategii doplatilo během světové recese roku 2008, když si zablokovali cenu 120 USD za barel leteckého paliva a vzápětí došlo k poklesu o více než 60 %. Od té doby letečtí dopravci přistupují velmi opatrně k hedgingovému programu a před jeho zajištěním provádějí řadu analýz trhu a porovnávají výhody a nevýhody. [11, 13, 15]

2.1.3 Nízkonákladová letecká společnost

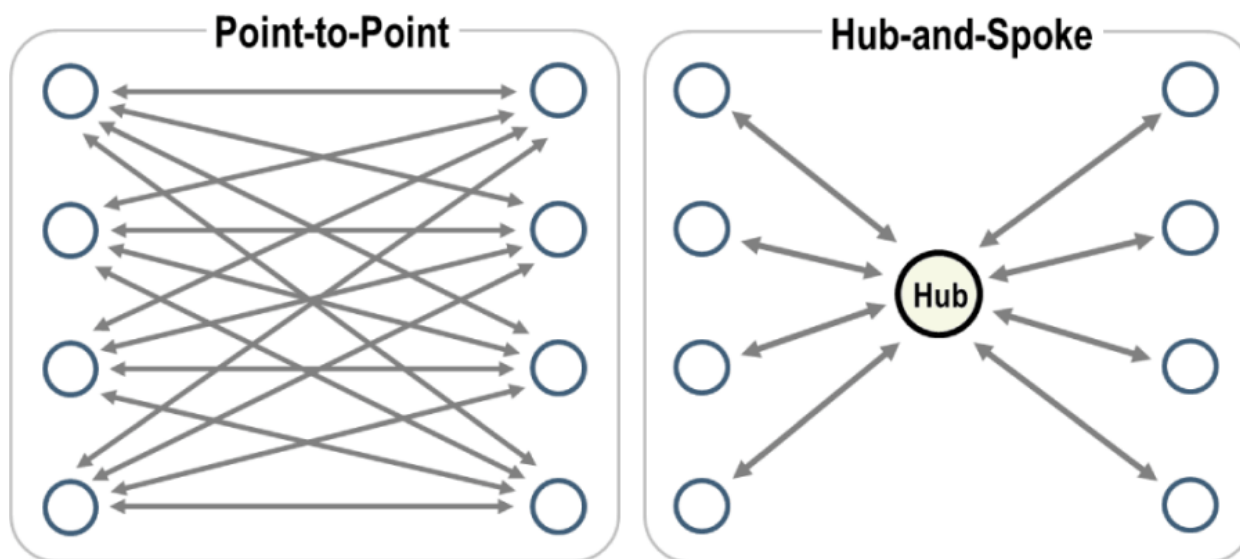
Dnes se obecně letečtí dopravci rozdělují do dvou skupin. Klasická letecká společnost nebo nízkonákladová letecká společnost, přičemž obě skupiny mají své výhody a nevýhody.

Klasické aerolinky nabízejí služby s fixní dobou odletu, která je provozována po celý rok pravidelnými lety. Na palubě letadla obvykle nabízejí více než jednu třídu. V ceně letenky je zahrnuto více služeb, jejichž úroveň je odlišná pro každou třídu na palubě. Jedná se o občerstvení

podávané v průběhu letu, větší prostor, spojení s přestupem na jednu letenku, možnost letět s jinými dopravci a další. Tradiční přepravci mají obecně tendenci využívat převážně uznávaná, primární letiště. Cena letenky bývá vyšší než u nízkonákladového dopravce, ale cestující může na základě věrnostních programů sbírat body za nalétané míle a čerpat různé výhody. Většinou mají velký letadlový park s různými typy letadel, s kterými obsluhují různé tratě a upřednostňují hub-and-spoke model přepravy. V Evropě jsou takoví dopravci převážně národní společnosti jako například Air France, KLM, Lufthansa, British Airways aj.

Nízkonákladoví dopravci (Low-cost carriers – LCC) se začali vyskytovat v 70. letech 20. století a vyvinuli se z původních charterových společností. Prvním nízkonákladovým přepravcem v Evropě se stala irská společnost Ryanair, která byla založena roku 1985. Další nízkonákladoví dopravci jsou EasyJet, WizzAir, SmartWings aj. LCC se odlišují od klasických aerolinií pomocí snižování provozních nákladů, což společnosti umožňuje snižovat cenu letenky. Snižování provozních nákladů provádí pomocí následujících bodů:

- jednotná flotila – provozováním pouze jednoho typu letadla dopravce ušetří na údržbě a výcviku;
- pouze jedna třída – LCC většinou provozuje pouze ekonomickou třídu, protože vyšší třídy by zvyšovaly náklady na personál a služby, zároveň by došlo ke snižování kapacity sedadel;
- maximální kapacita – maximální využití prostoru zajišťuje více obsaditelných míst;
- používání sekundárních letišť – primární mezinárodní letiště účtují vyšší letištní poplatky;
- provozní doba – provoz letů začíná v brzkých hodinách a společnosti se snaží, aby využití jejich letadel bylo co nejvyšší;
- žádné bezplatné služby – za veškeré služby navíc je nutné zaplatit, např. více odbavených zavazadel, občerstvení na palubě, rezervace hotelu, zajištění dopravy na letiště aj.;
- spoje point-to-point – LCC poskytují dopravu pro přímé spoje bez přestupů na krátké a střední tratě, tím se vyhnou mezipřistáním a letištním poplatkům;
- přímé prodeje online – LCC prodávají letenky přes internet a přes vlastní distribuční kanál. Nenavyšují tak náklady spojené s používáním globálních distribučních služeb. Zároveň ušetří na pronájmu prostor kamenných prodejen;
- tarifní struktura;
- menší flexibilita rezervace – nelze rezervovat konkrétní sedadlo a změna rezervace není možná nebo zpoplatněna;
- žádné nebo vlastní věrnostní programy.



Obr. 2 – Point-to-Point a Hub-and-Spoke systémy [79]

Některé letecké společnosti provozují rovněž charterové lety. Charterový let je nepravidelný let, tedy let na objednávku. Typickým příkladem charteru je pronájem kapacity letadla cestovní kanceláři, která jej realizuje pro své klienty. Chartery mají často sezónní charakter a jedná se o lety do dovolenkových destinací.

Soupeření mezi těmito dvěma skupinami vedlo k postupnému smazávání rozdílů, ve snaze rozšířit okruh zákazníků docházelo k přebírání rozdílných obchodních strategií a dnes se již hranice nedají přesně určit. Došlo ke vzniku tzv. hybridních aerolinek, které kombinují prvky obou zmíněných skupin a snaží se tak pokrýt potřeby co největší části trhu. Přejímání strategií vedlo hlavně ke sblížování nákladů na přepravu a dnes již rozdíl v nákladech mezi oběma typy aerolinií není tak markantní. Některé nákladové vstupy (např. cena paliva) v případě růstu zasahují všechny dopravce, tak že kromě absolutního rozdílu v nákladech se stírají i relativní rozdíly mezi dopravci.

Vstup LCC dopravců na trh naprosto změnil létání. Vytvořilo se konkurenční prostředí, kde svými nízkými cenami vytvářeli tlak na klasické dopravce, což u řady z nich vedlo k jejich zániku nebo odkoupení konkurencí. Některé klasické aerolinie si ve snaze vyhrát boj založily vlastní dceřiné společnosti (např. společnost Go založená British Airways, Song americkou Deltou apod.), nicméně ani tyto pokusy neměly většinou valný úspěch, neboť vedly ke tříštění vlastních trhů společnosti a s řadou omezení se nedokázaly plně vyrovnat nízkonákladovým společnostem. Často to tak končilo odprodejem poboček (často dokonce právě těm low cost dopravcům, kterým měly konkurovat, příkladem je již zmíněná pobočka Go, kterou odkoupilo EasyJet roku 2001) nebo značnou finanční ztrátou, což opět vedlo k posílení LCC. Podíl nízkonákladových dopravců na trhu každý rok roste, dnes je více než každá čtvrtá sedačka v dopravních letadlech na celém světě nabízena některým z nízkonákladových dopravců.

I přes tento růst LCC na trhu je nepravděpodobné, že by došlo k naprostému vytlačení klasických dopravců. Úspěch nízkonákladových dopravců je založen hlavně na rozdílu ceny oproti klasickým dopravcům, a proto by bez nich ztratili svoji největší výhodu. Také není možné uplatnit principy LCC na dálkových tratích. Nízkonákladové dálkové linky, tzv. long haul low cost, nelze dost dobře uplatnit. Dosavadní pokusy s obchodním modelem dnešních LCC buď zcela selhaly, nebo je z low cost konceptu převzata jen maximalizace počtu sedaček při omezených palubních službách, ale většina dalších prvků zůstane zachována z modelu klasických dopravců. Problémy pro uplatnění dalších prvků jsou hlavně:

- vstup do dálkové přepravy vyžaduje velké počáteční investice a je zatížen obchodním rizikem. Noví LCC takové možnosti nemají a zavedení silní nízkonákladoví dopravci jsou si všech rizik dobře vědomi a drží se proto raději svého stávajícího, osvědčeného modelu;
- na dlouhých tratích přibývá nákladových položek a nízkonákladoví dopravci se musí cenově přibližovat klasickým. Jediný způsob, jak tyto náklady v přepočtu na jednotku výkonu snižovat, je větší počet sedaček v letadle. To má u mnohahodinových letů ze zdravotních důvodů své limity, zvláště když se oproti klasickým dopravcům podaří v nejlepším případě udržet pouze minimální rozdíl v ceně, cestující poté není ochoten akceptovat vyšší míru nepohodlí;
- problémem na spousta tratích může být nenaplnění plné kapacity letadla. Klasičtí dopravci uplatňují spolupráce s více dopravci, kdy navzájem doplňují cestující. LCC takovouto spoluprací odmítá.

Ač je tedy nepravděpodobné, že by LCC vytlačili kompletně klasické dopravce z trhu, je možné, že časem se oba modely dopravců sblíží natolik, že splynou v jeden. Je také možné, že s vývojem technologií nebo s převratnými událostmi dojde ke vzniku nového modelu, který změní leteckou dopravu podobně jako nástup nízkonákladových dopravců. [3, 4, 14, 16]

2.2 Vliv technologického pokroku

Letecká technologie prošla dlouhou cestu, aby se dostala tam, kde je dnes. V průběhu minulého století proběhl nespočet testovacích letů. Spolu s nekonečným výzkumem vývoj leteckých technologií šel kupředu mílovými kroky, aby vytvořily lepší, bezpečnější a efektivnější letový zážitek. Mezi pokroky, které se řadí k významným činitelům můžeme přiřadit vývoj leteckých pohonů probíraný v kapitole 1.1, používané materiály, ovládání využívající mechanický přenos sil přes hydraulické prvky až po elektrický přenos (fly-by-wire), využívání nových navigačních prostředků, systém přetlakování kabiny a mnoho dalších.

2.2.1 Letecké materiály

V letectví se využívá mnoho druhů materiálů a každý materiál je vhodný pro jinou část letadla, podle její funkce a namáhání. Všechny materiály musí splňovat základní požadavky pro použití v létání, velká pevnost, ale zároveň co nejmenší hmotnost, důraz na bezpečnost, ale co nejmenší

ekonomické požadavky. Materiály si prošly dlouho historií, nicméně nepoužívanějšími jsou slitiny hliníku, dnes vytlačovány kompozitními materiály.

Základními materiály, používané při výrobě letadel v začátcích letectví byly dřevěné prutové konstrukci s potahovým materiálem nejčastěji plátnem. Bambus se použil jen na některých letadlech, ale uplatnění nakonec nenašel kvůli své křehkosti a také proto, že bambusové komponenty se obtížně spojovaly. Jasan se používal při výrobě ohnutých součástí. Dále se objevovalo dřevo smrku a borovice a zřídka se objevovala lípa a dřevo amerického ořechu. Pro obtahování povrchu křídel a trupu se používalo bavlněné plátno nebo lněná látka. Přibližně do roku 1911, podobně jako u balónů a vzducholodí, látku gumovali. Ocel byla využívána hlavně v konstrukci podvozku, spojovacích uzlech křídel a trupu, řídicích lankách a výztuhách. Nicméně dřevo i plátno je citlivé na změny teploty a vlhkost, a proto se začali hledat nové prostředky.

Kov se začal používat pro konstrukci letadel se zvyšujícím se výkonem motorů. Vyšší rychlosti způsobovaly větší síly v konstrukci a používané dřevo už nestačilo. Začaly se kombinovat ocelové trubkové konstrukce se dřevěnými a potahovým materiálem se stal ocelový plech. Nejznámější rané použití kovových letadel bylo během první světové války. Prvním celokovovým letounem na světě se stal Junkers J.I vyráběný německou firmou Junkers. Tento dvoumístný jednoplošník se samonosným křídlem měl trup letadla potažen vlnitým duralovým plechem. Vlnité pláště pomáhaly zvládat odpor vzduchu. Vlnění také umožňovalo zvětšit tuhost křídla bez zásadního zvětšení váhy, a proto se konstrukce stala velice rozšířenou ve výrobě letadel. Ze dřeva byly pouze vrtule, ukryté motorové lože, podvozková ostruha na zádi a pár prvků v kokpitu a stanovišti pozorovatele. Nicméně kvůli tomu, že firma Junkers nezvládala dodávat požadovaný počet letounů (50 letounů v první objednávce), přišlo vládní rozhodnutí o založení společného podniku spolu s nizozemskou společností Fokker, která dodávala Německu letouny Fokker Dr. I (asi nejznámější stíhací letoun 1. světové války byl Červený baron). Tento trojplošník měl rám trupu z ocelových trubek a silná dřevěná samonosná křídla. Ve spolupráci poté bylo vyrobeno 227 letounů Junkers J.I. Po válce pokračoval Junkers v kariéře konstruktéra. Už v roce 1919 vzlétl první celokovový dopravní letoun na světě-Junkers F.13. Šlo o dolnoplošník s rozpětím 17,7 m a délkou 9,6 m a kapacitou pro 4 až 6 cestujících. Dolet prvních verzí se pohyboval okolo 700 km. U Junkerse vzniklo ve dvacátých letech typů dopravních a nákladních letadel, počty vyrobených kusu ale nebyly nijak závratné – šlo maximálně o desítky. Nejrozšířenějším dopravním letounem se stal třímotorový Junkers Ju 52/3m, který vznikl z neúspěšné jednomotorové řady Ju 52/1m. Šlo o nákladní letoun s rozpětím 29 m, prototyp vznikl v 1931 a v roce 1932 byly dodávány první sériové kusy. Stroj sloužil u mnoha leteckých společností po celém světě. Stal se nejúspěšnějším meziválečným evropským dopravním strojem, před válkou bylo vyrobeno asi 1600 kusů. Byl to spolehlivý, bezpečný, robustní a dobře ovladatelný stroj. Během druhé světové války tvořily Ju 52 asi dvě třetiny bombardérů Luftwaffe.

V dobách války často dochází k významnému pokroku ve vědecké oblasti poskytující strategickou výhodu. Druhá světová válka se v tomto ohledu nijak nelišila. Boeing P-26 „Peashooter“ vstoupil

do služby v armádním leteckém sboru Spojených států jako první celokovový dolnoplošník. Malá P-26 byla známá svou rychlostí a manévrovatelností, tvořila jádro stíhacích letek Spojených států. Technologický pokrok v letectví dosažený během války našel uplatnění i v komerčním létání po válce. Během druhé světové války se začaly poprvé využívat plasty, počínaje výměnou kovových dílů za gumové díly v amerických letadlech poté, co Japonsko omezilo obchod s kovy se Spojenými státy. Následně plasty vyšších tříd začaly nahrazovat elektrické izolátory a mechanické součásti, jako jsou ozubená kola, řemenice a spojovací prvky. Výrobci letadel začali nahrazovat hliníkové díly plasty, protože byly lehčí a tím pádem úspornější než hliník.

Po druhé světové válce národy obrátily svou pozornost k nebi a dál. Vesmírný program v šedesátých letech měl zdánlivě nemožný úkol dostat lidstvo na Měsíc, a tak začal velký vesmírný závod. Vědci NASA (National Aeronautics and Space Administration – Národní úřad pro letectví a vesmír) věděli, že se zabývají novým územím v oblasti inovací a potřebovali materiál, který by dokázal proniknout zemskou atmosférou a zároveň chránit posádku kosmické lodi před extrémními životními podmínkami. Vědci z NASA se obrátili k plastům, konkrétně ke kvekaru a nylonu. Pod tělo kosmické lodi byly zabaleny vrstvy nylonu a dalších izolátorů, které posádku chránily před extrémními teplotami vesmíru. Oba tyto plasty se poté staly základem i v leteckém průmyslu.

Slitiny hliníku

Slitiny hliníku tvoří i dnes hlavní materiál při konstrukci letadla. Hlavním důvodem je malá hustota ($2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Čistý hliník se ale takřka nepoužívá, většinou se využívá ve formě slitin s jinými prvky, které zlepšují jeho vlastnosti. Při konstrukci se berou v potaz vlastnosti:

- pevnostní – měrná pevnost, měrná únavová pevnost, odolnost vůči poškození, měrná tuhost – ověřují se mechanickými zkouškami z různých teplot;
- technologické – tvařitelnost, obrobitelnost, svařitelnost, schopnost lepení – částečně se ověřují mechanickými zkouškami;
- provozní – odolnost vůči korozi, opravitelnost;
- ekonomická – výrobní cena, provozní náklady, náklady na likvidaci.

Nejpoužívanější slitiny hliníku:

- dural - dural je označení pro různé slitiny obvykle 90–96 % hliníku a 4–6 % mědi s menšími přísadami hořčíku, manganu aj. Oproti čistému hliníku je dural nepatrně hustší, ale až pětikrát pevnější v tahu i tvrdší. Využívá se pro konstrukci při stavbě draku na nosníky, žebra, přepážky, podélné výztuhy, části řízení letadla a další;
- superdural – má vyšší pevnost než dural a využívá se pro více zatěžované části, například pásnice nosníků křídel;
- pantal – slitiny s hořčíkem a křemíkem mají zvýšenou odolnost proti korozi a využívají se na plechy a nýty;

- silumim – patří k nejvýznamnějším slitinám, složení je z hliníku, křemíku, hořčíku a manganu. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají siluminy s eutektickým složením (cca 12 % Si). Jsou dobře odolné proti korozi.

Ocelové slitiny

Ocelové slitiny se využívají u více namáhaných konstrukcí. Výhodou oproti Al slitinám je vyšší pevnost, lepší svařitelnost a vyšší odolnost vyšším teplotám. Nevýhodou je vyšší hustota ($7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Používají se například pro podvozky, pásnice nosníků křídel, zesílená žebra, ozubená kola, náty, šrouby, ložiska a další.

Titanové slitiny

Titanové slitiny se vyznačují malou hustotou ($4500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), vysokou pevností, koroziodolností, žáruvzdorností a chemickou odolností. Je přitom třeba vzít v úvahu, že výroba titanu je v současné době finančně náročná a provozní nasazení titanových komponentů je účelné pouze v případech, kdy není možno použít levnější alternativu na bázi slitin hliníku.

Plasty

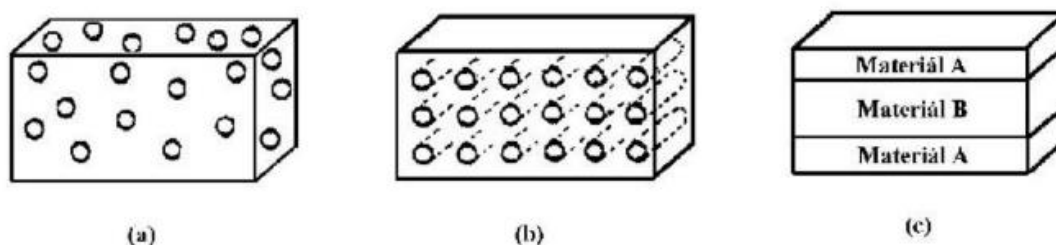
Plasty jsou organické sloučeniny skládající se z makromolekul obsahující tisíce atomů uhlíku a vodíku. Dále pak další prvky jako chlór, fluór, kyslík a další. Hlavní surovinou pro výrobu syntetických plastů je zemní plyn, hnědé a černé uhlí a ropa. Plast je hodně flexibilní uměle vyrobený materiál. To znamená, že podle konstrukčních požadavků lze měnit jejich vlastnosti v širokém rozsahu. Mezi výhodné vlastnosti vysokovýkonných plastů používaných v letectví patří jejich nízká hmotnost a vysoká pevnost. Přechodem výroby od hliníku/oceli na plasty lze dosáhnout významných úspor hmotnosti.

Výhody použití materiálů s nižší hmotností pro výrobu letounů s efektivním využitím paliva a nízkými emisemi jsou zřejmé, ale existují rovněž další výhody související s delší provozní životností součástí. Plasty pro aerokosmický průmysl navíc nejsou v leteckém provozním prostředí ovlivňovány korozi. Plasty se dělí do tří skupin:

- reaktoplasty – druh plastů, který se působením tepla vytvrzuje. To způsobuje, že přechází nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu. Výhodou je velká pevnost a odolnost povětrnostním vlivům;
- termoplasty – druh plastů, které působením tepla měknou, ale chemicky se při tom nijak nemění. Jsou vhodné pro výrobu součástí vstříkovaním, vyfukováním a odléváním;
- elastomery – druh plastů s vysokou mezí pružnosti. Tento plast je snadno deformovatelný, ale po odlehčení působící síly se součást vrátí do původního stavu.

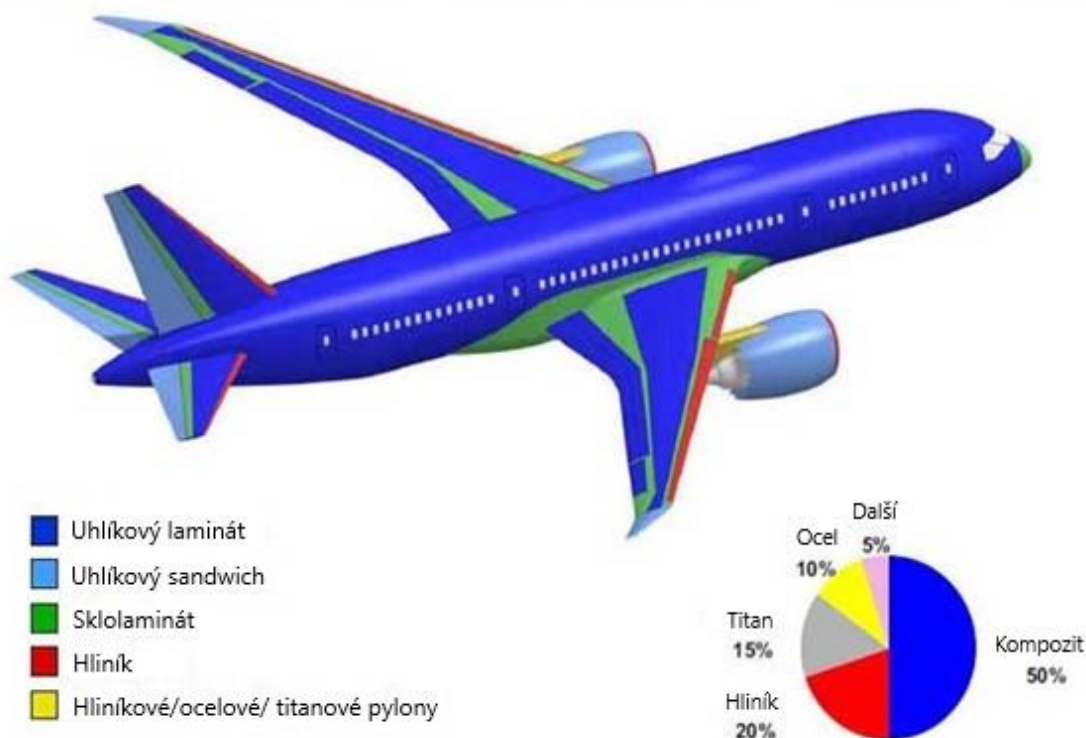
Kompozitní materiály

Kompozit je heterogenní materiál tvořený dvěma či více složkami, které se vzájemně liší svými chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Všechny fáze podílející se na vzniku kompozitu vytváří materiál, který dosahuje lepších vlastností, než by odpovídalo pouhému sečtení jednotlivých vlastností složek. Rozdělujeme na dvě složky – spojitá neboli matrice tvoří geometrickou podobu, chrání a udržuje druhou fázi – výztuž, která vyniká vysokou pevností, tvrdostí a modulem pružnosti, čímž se významně podílí na zlepšení vlastností kompozitu. Mezi výhody kompozitů řadíme: nízká hmotnost, vysoká tuhost a pevnost, dobrá lomová houževnatost, tvárnost, únavová pevnost, tlumení, odolnost vůči korozi a další. Dle geometrického rozložení výztuže dělíme kompozity na částicové, vláknové a vrstvené, viz obr. č 3, kdy každá má své vlastnosti a využití dle použitých materiálů. V letectví najdeme nejčastěji kompozitní materiály vyráběné kombinací vrstev uhlíkových nebo skleněných vláken s epoxidem.



Obr. 3 – Rozložení kompozitních materiálů, částicový(a), vláknový (b), vrstevnatý (c) [19]

V posledních letech rozšířili výrobci použití kompozitů na trup a křídla, protože tyto materiály jsou obvykle lehčí a odolnější vůči korozi než kovové materiály, které se tradičně používají v letadlech. V 90. letech 20.století Airbus A340 používal 5 % a Boeing 777 až 12 % kompozitních materiálů z celkové hmotnosti letadel. Na přelomu století umožnila pokročilá výroba kompozitů progresivní vzestup využití kompozitů v leteckém průmyslu. Boeing 787 je první velké dopravní letadlo v komerčním provozu složené převážně z kompozitních materiálů, obr. č 4, asi 50 % celkové hmotnosti bez motorů. Letadlo A350 od konkurenční společnosti Airbus dosahuje stejného podílu z hmotnosti.



Obr. 4 – Použité materiály v letounu Boenig 787 [18]

Kompozitní technologie není revolucí v letectví a pro některé části letadel se již v minulosti používala. Avšak od roku 2011 zahájili výrobci produkci velkých komerčních letadel převážně z kompozitů, což v letecké dopravě vytváří mnoho bezpečnostních obav, zejména kvůli nedostatku zkušeností s takovým designem a obrovským rozdílům ve zkušenostech s kovem a kompozitem. Je proto třeba přizpůsobení provozních a údržbových postupů tak, aby odpovídaly novým materiálům a nedocházelo k ohrožení bezpečnosti. [18, 19, 20, 21]

2.2.2 Systémy řízení letadla

Systémy řízení letadel prošly v průběhu let velkými změnami a vylepšeními. U prvních letounů bylo ovládání letu prováděno pomocí mechanického přenosu sil prováděného pomocí lan a táhel připojených k ovládacím prvkům a řídicím plochám. Tento způsob ovládání vydržel mnoho let, a i dnes se objevuje u menších letadel. S nástupem větších a rychlejších letadel přišlo mnohem vyšší zatížení od aerodynamických sil na řídicí plochy letadla, kvůli čemuž bylo stále obtížnější ovládat letoun pouze fyzickými silami pilota. Začaly se používat pomocné hydraulické servomechanismy k odlehčení sil působících v řízení pilota. Nicméně pilot kvůli odlehčení nebyl schopen odhadnout přesnou sílu potřebnou k řízení a při manévrování mohlo dojít k přetížení letadla a k poškození systémů. Proto se do řízení začaly zavádět tzv. prostředky pro umělé zavádění sil do řízení, pomocí hydraulických servomechanismů jako zpětná vazba při řízení letounu pro pilota. Hydromechanický systém pracuje na všech třech hlavních řídicích plochách, křídélkách, výškovce

a směrovce. Křídélka a výškovka jsou ovládány řídicí pákou a směrovka je ovládána pedály. S technologickým pokrokem se začaly používat první elektronické prvky v řízení. Byly použity v automatických stabilizačních systémech a tlumičech kmitání. Postupem času byly odstraněny mechanické spojení mezi pilotem a hydraulickým servomechanismem, a nahrazeny elektrickými a elektronickými prostředky ovládání letu. Zpočátku se jednalo o hybridní konstrukce, kde bylo v případě poruchy možné přejít k mechanickému ovládání letounu. Rychlý rozvoj digitální elektroniky dál vedl k vývoji Fly-by-wire systému, kde je mechanické ovládání zcela odstraněno a plně nahrazeno elektronikou. Tento systém se kvůli menší hmotnosti a značně zlepšeným manipulačním schopnostem používá v nejmodernějších dopravních letadlech. Architektura fly-by-wire byla vyvinuta v roce 1970 jako spolehlivý a sofistikovaný systém. [22]

Fly-by-wire k ovládání ovládacích ploch používá spíše elektrické signály než mechanické vstupy. Základní provoz systému fly-by-wire začíná tím, že pilot zadá povel, který se změní na analogový elektrický signál, který prochází mnoha elektrickými kabely a kanály, aby se zajistilo, že signál dosáhne palubního počítače pro řízení letu. Používá se více zálohovacích cest, nejčastěji 3 elektrické okruhy, pro zajištění dostatečné spolehlivosti. Počítač signál zpracuje a poté vyšle zesílený signál k hydraulickému servomechanismu, který řídí řídicí plochy. Během pohybu řídicích ploch se signál vrací zpět s informací o aktuální poloze do palubního počítače. Jakmile dosáhne řídicí plocha požadované polohy, přichází a odchozí signály se vzájemně vyruší a proces řízení se ukončí. V budoucích systémech se uvažuje o využití optických vláken pro přenos signálů. Současné zvyšování podílu kompozitních materiálů má nevýhodu, že kompozity nenabízejí žádnou přirozenou ochranu před vysokofrekvenčními vyzařovanými poli a elektromagnetickou interferencí, které vznikají přenosem elektrických signálů. Využívá se instalace stínění k ochraně systémů řízení letu, to ale zvyšuje náklady a hmotnost letadla. Optická vlákna by tento problém vyřešila.

Prvky řízení letadla rozdělujeme na primární a sekundární. Mezi primární řízení letadel patří tři základní operace: klonění, klopení a zatáčení. Klonění se provádí pomocí křidélek umístěných na vnější části křídla. Klopení se ovládá pomocí výškového kormidla a zatáčení pomocí směrového kormidla. Mezi sekundární prvky lze přiřadit všechny ostatní ovládané prvky, například klapky, zatahování a vysouvání podvozku, brzdy, řízení předového kola, sloty, spoilery a další. [22]

2.3 Další významné vlivy

Dnes je letecká doprava považována za nejmladší a nejdynamičtěji rozvíjející se oblast lidské činnosti, jež zásadně ovlivňuje globální ekonomiku a každodenní životy obyvatel. Jako taková významně přispívá k procesu globalizace. Na druhou stranu je velmi citlivá na globální dění, kdy některé události, byť třeba ne celosvětově významné, výrazně ovlivní názor společnosti, sníží zájem o cestování a ovlivní vývoj techniky a provozních postupů. K takovýmto událostem můžeme přiřadit teroristické útoky, letecké nehody, či přírodní katastrofy.

2.3.1 Letecké únosy

Letadlo za letu je velmi zranitelné a náchylné k ohrožení jeho bezpečnosti silou, ať cílenou jako teroristický čin nebo náhodnou jako chování nezvladatelných cestujících. S nárůstem objemu letecké přepravy se zvětšuje množství opatření zaměřených na zajištění bezpečnosti letecké dopravy. Letecké únosy rozdělujeme dle typologie motivů nejčastěji na náboženské, politické, psychopatologické a tzv. single-issue únosy. Nejznámější jsou únosy motivované náboženskou ideologií či politickými důvody (kromě již zmíněného 11. září 2001 jde také o únosy izraelských aerolinek prováděné organizacemi jako Lidová fronta pro osvobození Palestiny, Černé září a podobně), je třeba pamatovat i psychologická selhání jedinců, (například let Germanwings 9525 z března 2015) a na single-issue únosy (sem lze zařadit z minulosti útěky ze zemí komunistického bloku do západní Evropy).

Letecká doprava se postupem času stala jedním z vyhledávaných cílů teroristických akcí. Tyto útoky mohou mít dva různé základní cíle – buď únos letadla s možným využitím cestujících jako rukojmích nebo zničení letadla a zabití všech cestujících na palubě. Průběh je většinou podobný, teroristé se snaží zmocnit kontroly letadla ozbrojeným násilím, což vyžaduje schopnost propašovat zbraň (výbušné zařízení, pistoli či nůž) na palubu, její použití (nebo hrozba jejího použití) ke zneškodnění odporu a získání kontroly nad ovládacími a komunikačními prostředky letadla.

Důvody, proč zrovna letecká doprava je často cílem jsou:

- letecké únosy a havárie jsou vysoce medializované;
- civilní letadla jsou ve vzduchu téměř bezbranná a tvoří jednoduchý cíl;
- řada leteckých společností je národními společnostmi, takže pro teroristy jsou způsobem, jak poškodit danou zemi;
- letadlo může být rovnou i únikový prostředek.

Stupňující se únosy vedly ke vzniku mezinárodních úmluv, jak postupovat v těchto případech. V roce 1963 byla vypracována **Tokijská úmluva** (Úmluva o trestných a některých jiných činech spáchaných na palubě letadla). Úmluva se vztahuje na trestné a jiné činy spáchané osobou na palubě letadla za letu, registrovaného ve smluvním stát, a stanovila, že stát, ve kterém je letadlo registrováno, je příslušný k výkonu soudní pravomoci nad trestnými činy spáchanými na jeho palubě. Dále ustanovila, že země, ve které unesené letadlo přistane, vrátí letadlo právoplatnému vlastníkovu a umožní cestujícím a posádce pokračovat v cestě. V prosinci 1970 byla vypracována **Haagská úmluva** (Úmluva o potlačení protiprávního zmocnění se letadel). Úmluva přísněji vymezuje čin protiprávního zmocnění se letadla, klasifikuje ho jako trestný čin, definuje přísné tresty a umožňuje každému státu stíhat únosce, pokud je tento stát nevydá, a zbavit je azylu před stíháním.

Stupňovala se také letová, ale hlavně pozemní prevence. Skenování pasažérů a jejich zavazadel rentgenovými detektory bylo postupně doplňováno o ruční prohlídky, detektory kovů či moderní

přístroje, které dokážou na základě stěrů z těla odhalit, zda osoba nemanipulovala v posledních dnech s výbušnými latkami. Dále vznikly postupy pro profilování cestujících, kdy státy vyžadují pro své bezpečnostní složky přístup do rezervačních systémů leteckých společností tak, aby bylo možné sledovat pohyb podezřelých osob. V rámci letů do zemí, které představují riziko či by mohly být cílem útoků, jsou často i další opatření, například bezpečnostní rozhovor. Cílem bezpečnostního rozhovoru je identifikovat podle předem stanovených kritérií osoby, u nichž by mohlo být podezření z teroristických úmyslů. Další ochranou v rámci letu je zabezpečení pilotní kabiny proti neoprávněnému vniknutí a doprovázení letů takzvanými leteckými maršály. Jejich úkolem je být nenápadný a pozorovat, jestli nehrozí nějaké nebezpečí. V případě, že by nebezpečí nastalo, je vycvičen na to, aby ho eliminoval a zpacifikoval útočníka. [3, 4, 24]

Únos letu 305

První únos letadla, který byl provedený kvůli výkupnému a odstartoval v 70. letech „boom“ únosů ve Spojených státech, se stal 24. listopadu 1971. Během letu číslo 305 na trase z Portlandu do Seattlu byl Boeing 727 unesen. Na let trvající 30 minut v rámci států tenkrát nebyla potřeba identifikace cestujících a stačilo pouze uvedení jména. Letu se zúčastnil muž, který uvedl jméno Dan Cooper. Cestující během letu předal letušce zprávu, že má v kufříku bombu a požaduje 200 000 dolarů, dva padáky, a aby letadlo doplnilo palivo v Seattlu na další let. Pilot kontaktoval letovou věž a ta se obrátila na FBI. Od nich dostal příkaz spolupracovat s únoscem. Po splnění požadavků letadlo přistálo v Seattlu. Cooper přikázal, aby doplnění paliva proběhlo na odlehlém místě letiště a za ztlumených světel, aby se tak vyhnul případným odstřelovačům. Únosce byl podle svědků překvapivě klidný. Za splnění všech podmínek pustil všechny cestující, dohromady 37 rukojmích včetně jedné letušky. V letu poté pokračovali dva piloti, druhá letuška a technik. Během letu bylo letadlo následované americkými stíhačkami.

Cooper poté chtěl letět směrem do Mexika – to posádka vzhledem k nedostatku paliva odmítla a let byl namířen na Reno v Nevadě. Požadoval let ve výšce 3000 metrů, rychlostí $320 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, s vytažených podvozky a nenatlakovanou kabinou. Během letu přikázal únosce letušce, aby odešla do kokpitu. Následně si Cooper vzal jeden z padáků, otevřel zadní dveře letadla a vyskočil ven. Kvůli špatnému počasí ho doprovázející stíhačky neviděly.

Následné vyšetřování a prohledávání oblasti dopadu nic nepřineslo. Předpokládá se, že Cooper nepřežil seskok nebo lesní prostředí na které nebyl připraven. Tělo, ale ani peníze se nikdy neobjevily. Skutečná identita nikdy nebyla odhalena. Došlo k řadě výsledků, policie dokonce zatkla muže jménem D. B. Cooper, který byl ale okamžitě propuštěn, jelikož neměl s únoscem nic společného – od té doby se ale hledanému začalo říkat D. B. Cooper namísto původního Dan Cooper.

Po této události následovala řada dalších podobných pokusů. V reakci se posílily letové kontroly cestujících i jejich zavazadel v podobě detektorů kovů. V letadle se instalovaly průhledy na dveře kokpitu a tzv. Cooperova pojistka, která zabraňuje otevření zadních dveří za letu. [25]

2.3.2 Vliv leteckých katastrof

Letecká doprava je statisticky nejbezpečnější způsob dopravy vlivem přísných pravidel zaručujících vysokou úroveň bezpečnosti, vývojem technologií, správnou údržbou a vysokou úrovní výcviku. Postupným vývojem se snížil pětiletý průměrný počet smrtelných nehod na 13 za rok. Za rok 2019 se stalo 20 smrtelných nehod se 283 oběťmi. Oproti roku 2010 se tak průměr nehod snížil o polovinu. Ze statistik vyplývá, že téměř 70-80 % všech současných leteckých nehod je způsobeno chybou člověka. Následující graf č. 4 zobrazuje počet leteckých nehod se ztrátami na životech ročně v období od 1946–2019, neboť počet nehod před druhou světovou válkou byl výrazně nižší, a až po válce došlo k výraznému rozmachu letectví a tím i k růstu počtu nehod.

Dnešní dopravní letadla jsou konstruována podle filozofie "bezpečná při poruše" (Fail Safe), což znamená, že všechny důležité části a systémy letadla jsou buď zálohovány (někdy i několikanásobně), nebo jsou zpracovány postupy, jak dokončit let i v případě poruchy. Pravděpodobnost vzniku poruchy vychází z modelu spolehlivosti zpracovaného výrobcem jako součást procesu typové certifikace letadla a je dána konstrukčním řešením, způsobem namáhání a stavem opotřebení všech částí, které se mohou podílet na vzniku dané poruchy. Smyslem údržby je udržet pravděpodobnost vzniku technické závady, kombinace závad či řetězu závad, které by mohly vést k nehodě letadla, pod předepsanou úroveň.



Graf 4. – Počet leteckých nehod s úmrtím a 5letý průměr 1946-2019 [26]

Nehody s lidskými oběťmi, případně s vážnými zraněními účastníků, jsou vždy velkou tragédií a zkouškou psychické odolnosti, jak pro pozůstalé, tak pro přeživší. V letectví jsou tyto události ještě umocněny tím, že velké procento nehod končí úmrtím posádky a cestujících, fatálním zničením letadla, škodami na majetku a případně poškozením třetí strany. Jakákoliv letecká nehoda či incident je silně medializována a ohrožuje důvěru veřejnosti v leteckou dopravu. Šetření

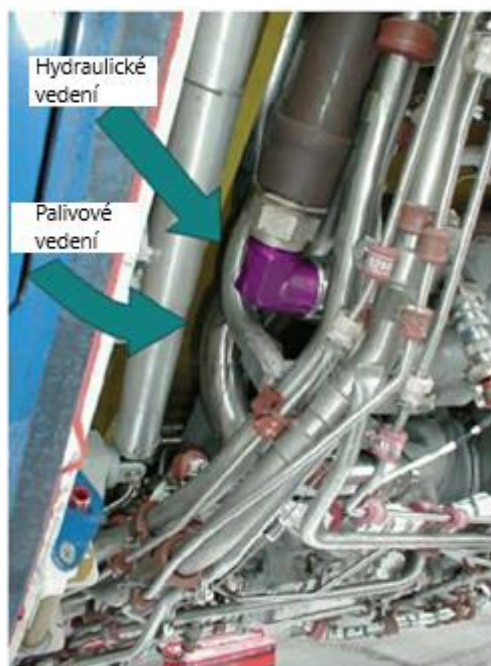
těchto událostí spadá pod nejrůznější organizace, které jsou na takovéto události odborně zaměřené, mají zajištěná patřičná povolení a zpracovaný detailní postup vlastního šetření. Většinou se jedná o organizace zřízené vládou, v České republice se jedná o Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod (ÚZPLN). Jejich hlavním úkolem je zjištění příčiny a zajištění prevence budoucích nehod a incidentů bez určování viny či odpovědnosti. Zahrnuje shromáždění a analýzu informací o letecké nehodě, vypracování závěrů včetně určení příčiny nebo faktorů, které k nim přispívají, a případně vypracování bezpečnostních doporučení pro výrobce, provozovatele, údržbu, posádku a další účastníky provozu. ÚZPLN postupuje podle předpisů L13 (Předpis o odborném zjišťování příčin leteckých nehod a incidentů), zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví, předpisů EUROCONTROL (European Organisation for the Safety of Air Navigation – Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu) a předpisů Evropské unie upravujícího šetření nehod a incidentů v civilním letectví.

Příčiny leteckých nehod se časem mění. Dříve více převažovaly letecké nehody z důvodu selhání letecké techniky, protože letadla obsahovala konstrukčně nespolehlivé součásti, což umocňoval fakt, že systémy řízení nebyly zálohované. Dříve také piloti méně využívali vypracované nouzové postupy, které snižují riziko vzniku letecké nehody při nenadálé situaci, ať už z důvodu jejich úplné absence, nebo jejich ignorace. V pozdějších letech se daleko výrazněji vyvíjela obchodní letecká přeprava, s kterou přišel větší důraz na bezpečnostní opatření. Tvořily a zlepšovaly se postupy a limity bezpečnosti provozu letadel a letišť, které vedly k celkovému zvýšení úrovně bezpečnosti provozu. Na základě zjištění příčin nehod, a aby se znovu neopakovaly, se měnila konstrukce letadel (například již zmíněné nehody letounů typu Comet), postupy údržby (let Air Transat 236), výcvik leteckých posádek, změny leteckých postupů a frazeologie (nehoda na Tenerife, význam slov „take off“ a „departure“) a mnoho dalších. [3, 26, 29]

Nehoda letu Air Transat 236

Nehoda se stala během letu z Toronta do Lisabonu v noci z 23. na 24. srpna 2001. Jednalo se o pravidelný transatlantický let s číslem TS 236 aerolinek Air Transat. Letounu Airbus A330 vysadily oba motory z důvodu vyčerpání paliva. Nicméně piloti, kapitán letu Robert Piché (48) a první důstojník Dirk de Jager (28), dokázali nouzově přistát na letišti vzdáleném téměř 130 kilometrů na Azorách. Zachránili tak všech 293 cestujících. Následující vyšetření ukázalo, že nehoda vznikla z důvodu špatné výměny náhradních dílů.

Letadlo Airbus A330-243 bylo 5 dní před nehodou na pravidelné údržbě. Během ní našli kovové části v olejovém systému pravého motoru značky Rolls-Royce RB211 Trent 772. Z toho důvodu se rozhodli motor vyměnit za starší model, který neobsahoval hydraulickou pumpu. Použili pumpu z původního motoru, nicméně vedení hydraulické kapaliny bylo o pár milimetrů delší. Hlavní technik údržby sice upozornil na nekompatibilní díly, nicméně na nátlak vedení společnosti, které nechtělo odstavit letadlo, výměnu provedli. Vlivem tlaku poté došlo ke kontaktu hydraulického vedení a vedení paliva, které se prodloužilo a zlomilo.



Obr. 5 – Zobrazení hydraulického a palivového vedení [28]

V 04:38 UTC letadlo začalo ztrácet palivo. V 05:03 byli piloti upozorněni palubním počítačem na nízkou teplotu oleje, nízkou zásobu oleje a vysoký tlak oleje. Předpokládali, že se jedná o chybu signalizace. V 05:33 UTC počítače signalizovaly výrazný pokles hladiny paliva v pravé nádrži. Piloti nepředpokládali únik paliva a řídili se dle letového manuálu, začali přecerpávat palivo z levé nádrže. Když nedošlo k vyrovnání hladin, piloti si uvědomili, že se jedná o únik. V té době bylo v nádržích asi 11 tun paliva, což by nestačilo na zbytek cesty do Lisabonu. V 05:45 změnili směr na nejbližší letiště, vojenskou základnu v Lajes na Azorách a vyhlásili nouzový stav z důvodu nedostatku paliva. V 06:13 letadlu vysadil pravý motor. Letadlo bylo ve výšce FL390 a ve vzdálenosti 280 km od letiště. Piloti ohlásili letovému řízení, že motor přestal pracovat. V 06:26 přestal pracovat i druhý motor ve vzdálenosti 120 km. Bez pohonu ztrácel letoun výšku 300 metrů na každých 5 kilometrů ($610 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), nicméně piloti dokázali doplachtit zbylou vzdálenost. Před příletem potřebovali ztratit výšku, proto provedli otočku o 360° a těsně před dosednutím několik S manévrů. V 06:45 se poprvé dotkli země s rychlostí $370 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ asi 310 m za prahem runwaye. Následně letadlo odskočilo asi o 540 m dál, kdy už dosedlo trvale. Piloti použili nouzové brzdění a zastavili asi 700 metrů před koncem runwaye. Následovala nouzová evakuace, kdy všech 306 osob přežilo, pouze 16 osob utrhlo lehká zranění a 2 osoby těžká zranění. Letadlo utrpělo poškození hlavního podvozku a spodních částí letounu.

Vyšetření nehody se ujal portugalský úřad pro vyšetřování a prevenci leteckých nehod za pomoci francouzských a kanadských úřadů. Po vyšetření příčin nehody společnost Air Transat uznala svoji odpovědnost a dostala od kanadských úřadů pokutu ve výši 250 000 kanadských dolarů. Dále došlo ke změně výcviku pilotů, byl přepracován manuál pro případ úniku paliva, kdy je nutné před

přečerpáváním paliva zkontrolovat, zda nedochází k úniku. Airbus přepracoval palubní systém, kdy nyní předává zprávu, pokud dochází k větší spotřebě, než je očekávána. Piloti sice selhali v zjištění, že se jedná o únik, nicméně, po návratu do Kanady byli uvítáni jako hrdinové za vynikající zvládnutí situace. [27, 28]

2.3.3 Přírodní katastrofy

K přírodním katastrofám dochází každoročně, často se odehrají nepředvídatelně a vyžádají se tisíce obětí. Existují oblasti, ve kterých je výskyt kalamit mnohem pravděpodobnější a v takovýchto oblastech je třeba, aby letiště byla připravená. Klasifikujeme je podle prostředí jejich vzniku. Prostředím je:

- kosmos – pád mimozemského tělesa;
- atmosféra – tropické cyklóny, tornáda či pískové a prachové bouře;
- hydrosféra – bouřlivé přílivy, tsunami, povodně;
- zemský povrch – ničivé svahové pohyby – sesuvy;
- celá zemská kůra až do svrchního pláště – sopečné výbuchy, zemětřesení.

Země na rozhraní tektonických desek jsou příkladem častých seismických aktivit. Velká část těchto činností se odehrává na mořském dně a přináší další riziko tsunami nebo přílivových vln. Existují tři hlavní rizika seismických aktivit:

- zemětřesení – zemětřesení způsobuje pohyb litosférických desek. Slabá zemětřesení, která člověk buď vůbec nepocítí, nebo která se projeví na nestabilních předmětech v domácnosti, jsou velmi častá i v seismicky klidnějších oblastech. Silnější zemětřesení jsou pak vázána většinou na aktivní tektonické oblasti a jejich výskyt je méně častý. Zemětřesení vzniká nahromaděním napětí v zemské kůře a jeho náhlým uvolněním. Epicentrum je místo na zemském povrchu nejbližší ohnisku;
- tsunami – zemětřesení může způsobit deformaci mořského dna, která dále vyvolá obrovské mořské vlny a tsunami;
- sopečná erupce – během sopečná erupce dochází k výronu magmatu na povrch tělesa. Je vyvolávána tlakem sopečných plynů uvolňujících se z magmatu během výstupu. Ohrožením jsou výlevy lávy, když se valí k lidským sídlům poblíž sopky. Větším nebezpečím pro letectví než lávy jsou vývrhy sopečného popelu. Stovky krychlových kilometrů částic dokážou zastínit slunce, ochladit atmosféru na řadu let a ohrozit letový provoz. [30]

Letištní pohotovostní plánování

Dle předpisu L14 musí každý provozovatel letiště vypracovat Letištní pohotovostní plán odpovídající velikosti provozu letadel a činnostem prováděným na daném letišti, který zajišťuje koordinaci potřebných činností odpovědných útvarů, v případě vzniku mimořádné události na letišti. Mezi odpovědné útvary na letišti řadíme např. složky řízení letového provozu, záchranná a požární služba, správa letiště, lékařské a ambulantní služby, provozovatelé letadel, bezpečnostní

služby a policie. Dokumentace letištního pohotovostního plánu musí obsahovat nejméně následující:

- typy předpokládaných událostí;
- útvary zahrnuté do plánu;
- odpovědnost a úkoly každého útvaru, pohotovostní operační středisko a místo velení pro každý typ pohotovosti;
- jména a telefonní čísla kanceláří nebo lidí pro spojení v případě konkrétní mimořádné události;
- mapu letiště a jeho bezprostředního okolí s kartografickou sítí. [33]

Emergency response plan

Na základě Annex 19 - Řízení bezpečnosti, musí být každé letiště připraveno na krizové situace podle dokumentu Emergency response plan (ERP). EASA (European Union Aviation Safety Agency – Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví) vydala v roce 2012 na základě nařízení Komise Evropské unie č. 1178/2011 předpis zabývající se požadavky na provozovatele v oblasti posádek letadel, Part ORA. Tento předpis byl v roce 2013 aktualizován Rozhodnutím č. 2013/008/R výkonného ředitele EASA.

V případě krizové situace, do kterých řadíme i přírodní katastrofy, letiště musí postupovat dle ERP. Tento dokument je sestaven jako manuál, ve kterém jsou rozděleny a definovány role jednotlivých zaměstnanců. Každá jednotlivá role plní seznam úkolů či činností, které musí být během krizové situace vyřešeny. V předpisech však nejsou uvedeny konkrétní kroky, pouze doporučení struktury a body, které by ERP mělo obsahovat:

- stanovení osob, které se budou nouzi zabývat a jejich zodpovědnost;
- dokumentace postupů a procesů v nouzi;
- koordinace práce s vnějšími a vnitřními skupinami;
- bezpečné zvládnutí nezbytných operací, dokud krize není pod kontrolou;
- proaktivní stanovení všech možných nouzových událostí a scénářů, jejich řešení a vytvoření systémů pro jejich zmírnění.

Prioritami při ERP jsou ochrana a bezpečnost, stabilizace nebezpečného stavu a náprava důsledků incidentu, ať už jde o fyzickou nebo koncepční. [33]

Vulkanický popel

Vulkanický popel je z hlediska letecké dopravy, oproti ostatním produktům vulkanické činnosti, vážný problém, protože významně narušuje vzdušný prostor a letadla jsou citlivá i na nízké koncentrace popela. Zatímco dnes je již nebezpečí vulkanického popela dobře známo, do roku 1982 nebyl považován za hrozbu. To se změnilo s prvním incidentem dopravního letadla, který téměř vyústil v havárii. Od té doby je vulkanickému popelu věnována pozornost ze strany úřadů

a mezinárodních organizací. Vulkanický popel ohrožuje leteckou dopravu nejen poškozením konstrukce letadla, jeho motorů, ale též kontaminací letiště a jeho vybavení.

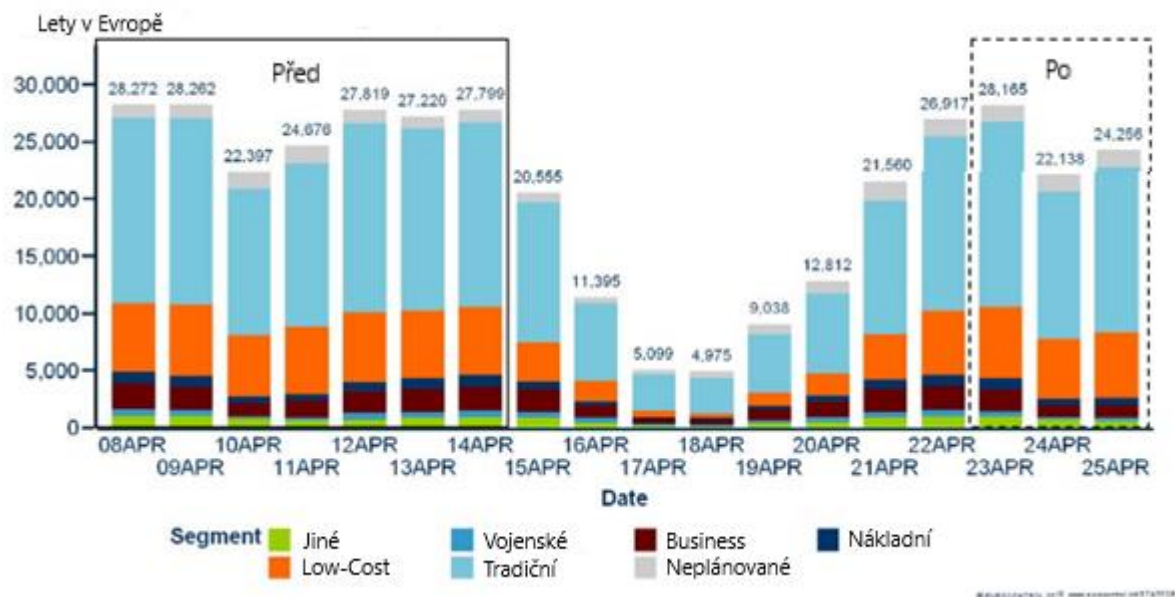
V závislosti na hrubosti popela dochází k abrazivnímu poškozování celého povrchu draku. Dochází k obrušování náběžných hran, což má za následek zhoršování aerodynamických vlastností. Obrušováním oken pilotní kabiny dochází k jejich zneprůhledňování a znemožňování vizuální orientace. Může dojít k poškození prvků různých systémů, které jsou umístěné na povrchu. Do těchto prvků spadá pitot-statická trubice a jiná snímací zařízení, antény navigačních systémů a komunikace, případně popel může kontaminovat vnitřní prostory a systémy.

Velkým problémem je nasávání popela proudovými motory a tavení popela do sklovitého materiálu, který se poté ukládá v částech turbíny motoru, na statorových lopatkách a celkově dochází k zanášení motoru. To způsobuje zmenšování průchozího prostoru a zvyšování tlaku ve spalovací komoře. Ve spalovací komoře je nedostatek kyslíku, což se projevuje neúplným spalováním paliva. Výsledkem jsou pulzace v motoru, ztráta tahu a úplné selhání motoru. Na turbíně způsobuje ukládaný materiál snížení účinnosti turbíny a tím i výkonu celého motoru. Dále dochází k abrazivnímu poškozování lopatek kompresoru a snižování jejich životnosti a účinnosti.

Pokud popel pokryje souvislou vrstvou odbavovací plochy, runwaye, pojezdové dráhy, ale i techniku, světelná návěstidla, letištní budovy či radionavigační systémy výrazně tak omezí provoz, sníží viditelnost, ohrozí bezpečnost a zvýší nároky na schopnosti nejen posádek letadla, ale i pozemního personálu. Pokud dojde k takovéto události většinou to vede k úplnému uzavření letiště, až do doby, kdy je popel odstraněn. Odklizení popela je nákladné a náročné, protože nestačí pouze odklidit popel z provozních ploch letiště, ale je nutné zajistit jeho odklizení mimo letiště tak, aby nedošlo k opětovné kontaminaci provozních ploch např. v důsledku rozfoukání popela větrem. [30, 31]

Erupce sopky Eyjafjallajökull

Letecká doprava nad Evropou byla paralyzována kvůli erupci islandské sopky Eyjafjallajökull (14. dubna 2010) od 15. dubna do 21. dubna 2010, omezení se výrazně dotkla i transatlantických letů. Zrušeno bylo na 100 tisíc letů, výluka zasáhla 29 procent celosvětové letecké dopravy. Opatření se týkala více než 300 letišť a postiženo bylo deset milionů cestujících fakticky ve všech částech světa. Během dalších menších erupcí během května došlo k zrušení asi 7000 letů. Dubnové uzavření vzdušného prostoru způsobilo leteckým společnostem finanční ztráty odhadované na 1,7 miliardy dolarů.



Graf 5. – Počet a rozdělení letů v Evropě během dubna 2010 [31]

Tato bezprecedentní situace způsobila řadu změn v postupech při kontaminaci vzdušných prostorů vulkanickým popelem. ICAO zřídilo Mezinárodní úkolovou jednotku pro vulkanický popel (International Volcanic Ash Task Force – IVATF), jejímž úkolem je koordinace opatření přijímaných v souvislosti s vulkanickým popelem a jejich úprava, a to jak na globální, tak regionální úrovni. Jejím nejvýraznějším rozhodnutím bylo zrušení nulové tolerance a odsouhlasení bezpečné koncentrace vulkanického popela $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ pro leteckou dopravu. To znamená, že k uzavření letiště a zákazu provozu letadel dojde pouze v oblastech s vyšší než povolenou koncentrací a v ochranném pásmu o rozměru 60 NM. [30, 31]

SOUČASNÉ POŽADAVKY

3. SOUČASNÉ LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY NA LETADLOVOU TECHNIKU PRO LETECKOU PŘEPRAVU

Letiště je významným členem dopravní infrastruktury. Počty odbavených letů se v posledních letech významně zvyšují. Letiště Praha za rok 2019 odbavilo více než 17,8 milionu cestujících, což oproti předchozímu roku 2018 činilo nárůst o 6 %. Tento nárůst nicméně zvětšuje dopady na životní prostředí, a proto roste tlak na provozovatele letišť a výrobce na snižování dopadů. Letiště jako zdroj negativních dopadů na prostředí je však vnímáno okolím mnohem citlivěji a intenzivněji, zejména v důsledku každodenních osobních zkušeností s leteckým hlukem, který je hodnocen jako jeden z nejhorších vlivů na životní prostředí a životní pohodu lidí.

V průběhu let se kladl čím dál větší důraz na právní úpravu ochrany životního prostředí. Základem přístupu ČSL (Česká správa letišť) k ochraně životního prostředí se stal dokument Koncepce péče o životní prostředí z roku 1992. Obsahoval záměry ke zlepšování životního prostředí a jeho ochrany po předchozí analýze nedostatků na každém letišti pod správou ČSL. V současnosti se ochrana životního prostředí opírá o soustavu vnitřních organizačních předpisů a norem. Každý letoun v členských zemích ICAO musí splňovat certifikační zkoušku o hlukové způsobilosti a motorových emisích podle Annex 16. Pro Českou republiku musí splňovat podmínky dle předpisu L16. Tato osvědčení kontroluje a vydává Úřad pro civilní letectví. [1,]

Mimo tento předpis platí řada nařízení a směrnic Evropské unie České republiky:

- směrnice EP a Rady 2002/49/ES o hodnocení a řízení hluku ve venkovním prostředí;
- nařízení EP a Rady (EU) č. 598/2014 o pravidlech a postupech pro zavedení provozních omezení ke snížení hluku na letištích Unie v rámci vyváženého přístupu;
- směrnice 2008/101/ES o vytvoření systému pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství;
- nařízení vlády č. 9/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska emisí hluku;
- zákon č. 49/1997 Sb. Zákon o civilním letectví;
- zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví;
- nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací;
- zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. [82]

3.1 Legislativa L-16

Posuzování stavu akustické způsobilosti a emisní způsobilosti spadá do povinností příslušného certifikačního úřadu (pro Česko republiku je to Úřad pro civilní letectví – ÚCL). Ten pro každé letadlo vydává osvědčení o hlukové způsobilosti a osvědčení emisní způsobilosti. Pro vydání

osvědčení letadlo musí prokázat, že splňuje příslušné hlukové a emisní limity podle platných standardů předpisu L-16. Osvědčení hlukové způsobilosti je vydáváno s neomezenou dobou platnosti a musí obsahovat informace uvedené v předpisu L16/I hlava I. Mezi tyto informace spadá:

- název státu zápisu do rejstříku;
- název dokumentu dokládajícího ověření hlukové způsobilosti;
- číslo dokumentu;
- poznávací značka;
- výrobce a typ letadla;
- výrobní číslo letadla;
- výrobce, typ a model motoru;
- typ a model vrtule u vrtulových letounů;
- maximální vzletová hmotnost v kilogramech;
- maximální přistávací hmotnost v kilogramech;
- další modifikace provedené za účelem splnění požadavků na ověření hlukové způsobilosti;
- datum vydání osvědčení o hlukové způsobilosti;
- podpis úředníka, který dokument vydal;
- dále obsahuje hladiny hluku v jednotlivých fázích letu podle splnění požadavků tohoto předpisu.

Měření hluku probíhá na třech referenčních bodech, které jsou umístěny na zemi a měří se hladiny při příletu, přeletu a odletu.

Osvědčení emisní způsobilosti se vydává pro všechny motory zvlášť a musí obsahovat minimálně tyto informace podle předpisu L16/II, části III, hlavy 1:

- název certifikačního úřadu;
- označení typu a verze výrobcem;
- prohlášení o každé dodatečné modifikaci zavedené pro účely splnění příslušných požadavků emisní způsobilosti;
- jmenovitý tah;
- referenční poměr stlačení;
- prohlášení o splnění požadavků na hodnotu kouřového čísla;
- prohlášení o splnění požadavků na plynné znečišťující látky.

ÚCL se zaměřilo na kvalitu ovzduší v předpisu L16/II, kde udává pokyny pro ověřování emisní způsobilosti s požadavky na kouřivost, plynné a pevné emise nových leteckých motorů. Dále hlídá emise z letištních zdrojů, vliv odmrazovací techniky a vliv stárí motorů na produkci emisí. L16 dále obsahuje svazky L16/III – Emise CO₂ letounů a L16/IV – Program kompenzace a snižování emisí oxidu uhličitého v mezinárodním letectví. [32, 33]

3.2 Hluk

Zvuk na lidské vnímání působí svojí intenzitou, výškou a proměnlivostí. Fyzikálně ho lze popsat jako mechanické vlnění šířící se v prostoru, o určité frekvenci a amplitudě. Hlukem se stává, jakmile začne působit rušivě. Dlouhodobé působení nadměrného hluku může mít negativní vliv na zdraví jedince a na kvalitu života. Při dlouhodobém působení může u člověka vyvolat zhoršení sluchu, stres, zvýšený krevní tlak, bolesti hlavy, potíže se soustředěním a ovlivnit schopnosti jedince. Hluk se měří pomocí jednotek decibelu (dB). Hodnota 0 dB je práh slyšení a 130 dB práh bolestivosti, kdy zvuk působí bolest v uchu. Od této hodnoty výše může způsobit trvalé poškození sluchového nervu. V letectví se také používá jednotka EPNdB, která není přímo měřitelná a musí se dopočítávat. Tato jednotka popisuje míru obtěžování člověka hlukem letadla.

Hluk způsobený letounem byl problémem od začátku letectví. Při přechodu z pístových motorů na proudové v 60. letech a se zvyšováním hustoty dopravy se zájem o tuto problematiku postupně zvětšoval. Roku 1968 shromáždění ICAO přijalo nařízení týkající se hluku a vydalo doporučující materiály pro kontrolu hlasitosti zvuku na letištích a okolí. Annex 16 je částí přílohy Chicagské úmluvy a obsahuje postupy pro měření hlasitosti, lidské tolerance na hlasitost, způsoby osvědčování hlasitosti letounů, postupy pro snižování hluku letadel a nároky podle jednotlivých typů letadel. Během let se tento annex postupně vyvíjel a doplňoval, jak rostly nároky na ochranu životního prostředí.

Letadlo vytváří hluk hlavními dvěma způsoby – aerodynamicky a mechanicky. Oba tyto způsoby je snaha minimalizovat zdokonalováním techniky. Aerodynamický hluk je způsoben obtékáním vzduchu okolo letadla a mechanický hluk je způsoben mechanickými pohyby letadla, motoru a jeho částí. Obecně platí, že při vzletu je dominantnější mechanický hluk, kdy je třeba vyvinout velký výkon motoru pro dostatečný tah. Při přiletu je naopak dominantnější aerodynamický hluk, kdy je tah motoru minimální. [34]

3.2.1 Aerodynamický hluk

Aerodynamický hluk vzniká v důsledku narušování laminárního proudění na jednotlivých částech letadla. Toto narušování způsobuje nejen hluk, ale také zvyšuje odpor proudícího vzduchu a tím zvyšuje spotřebu paliva. Hladina hluku závisí na rychlosti letadla, hustotě vzduchu a aerodynamických vlastnostech konstrukce. Mezi částmi, kde se vytváří nejvíce hluku spadá vztlaková mechanizace, vytažený podvozek a nedokonalosti trupu letadla. Celkově je snaha snižovat odpor působící na povrch letadla. Zkoumají se různé materiály, které působí malý odpor proudícímu vzduchu. Dále se povrch upravuje proti menšímu zachytávání nečistot a hmyzu, které také snižuje aerodynamické vlastnosti. Tyto postupy spadají do tzv. pasivní kontroly proudu vzduchu. Spadá sem také úprava geometrických tvarů na povrchu letadla pro hladší obtékání vzduchu např. na odtokové hraně křídla, otvory pro doplnění paliva, konstrukční spoje aj. Velký podíl na aerodynamickém hluku má podvozek, který má velké množství různě tvarovaných částí

a nelze je přímo upravit. Proto je snaha zakrýt jednotlivé části podvozku aerodynamickým krytem, který má lepší tvar a vzduch ho lépe obtéká. Dále existuje aktivní kontrola proudu vzduchu, metody spočívají ve využití aero akustického designu pro části letadla způsobující hluk. Byly provedeny pokusy s povrchovým nasáváním vzduchu a vypouštěním za odtokovou hranou, čímž dojde ke zmenšení mezí vrstvy a méně výraznému turbulentnímu proudění. Zkoumají se také metody, které spočívají ve vzájemné interferenci dvou opačných vln a následnému vyrušení, a možnosti využití trysek, které by byly umístěné na povrchu křídla, pouštěly by vzduch do mezní vrstvy, čímž by způsobily pozdější oddělení od povrchu křídla. Tyto metody nejen že snižují hluk způsobený na křídle, ale také zlepšují aerodynamické vlastnosti letu. [35]

3.2.2 Mechanický hluk

Mechanický hluk vzniká mechanickými pohyby stroje a chodem pohonné jednotky. Mezi letadlové systémy vytvářející nevíce hluku patří pomocná jednotka APU, klimatizace a komunikace. Největším zdrojem hluku jsou motory. Je třeba rozlišovat skupiny letadel na pístové, turbovrtulové a proudové. U pístových letadel je největším zdrojem hluku samotný pístový motor a hluk vznikající na vrtuli. Podobně jsou na tom turbovrtulová letadla. U proudových letadel je největším zdrojem hluku protékání vzduchu přes pohonnou jednotku, kdy je vzduch stlačován kompresorem, vháněn do spalovací turbíny ve směsi s palivem, následuje vznícení směsi a rychlá expanze. Největší podíl má hluk z trysek. Hlasitost hluku je přímo úměrná relativní rychlosti proudícího vzduchu. Pro snížení hluku se používají tlumiče na výstupu spalin z motoru. Nejvíce mechanického hluku vzniká při odletu letadla, neboť motor musí vyprodukovat dostatečný tah pro vzlet. [38]

3.3 Emise

Letecké emise jsou zvětšujícím se zdrojem znečišťování přírodního prostředí. Podle odhadů by se do roku 2050 objem letecké dopravy měl zvětšit na 6,5 – 15,5ti násobek oproti roku 1990. Z hlediska spotřeby je samotný let rozdělen do fází, které se hodnotí podle doby a spotřeby paliva během fáze. Fáze mohou mít vliv na životní prostředí lokální nebo globální. Poblíž letišť provoz ovlivňuje ovzduší, zdraví obyvatel a pracovníků, proto je nutné řešit pojiždění, vzlet a přistání. Globální vliv má hlavně fáze letu, neboť vypouštění emisí ve stratosféře má výrazně větší vliv na klima. Fáze se dělí následovně:

- pozemní pojiždění – doba od prvního pohybu letadla až po vzlet na ranveji, nebo od prvního dotyku po přistání až do zastavení letadla;
- vzlet – definován jako náhlý nárůst akcelerace na vzletovou rychlost, náklon letadla a je ukončen buď dosažením výšky 35 stop nebo zasunutím podvozku;
- stoupání – letadlo po vzletu vystupá na cestovní výšku;
- let – doba od ukončení stoupání po začátek klesání;
- klesání – prudké a nepřerušované klesání k cílovému letišti;
- přistání – první dotyk kol, relativní výška letadla vůči letišti je nulová.

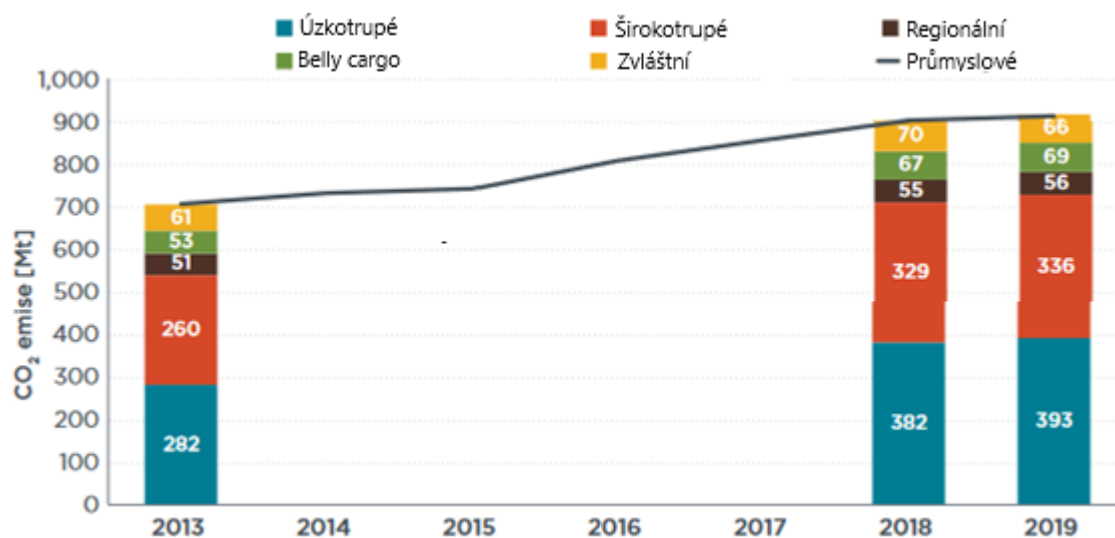
Databáze ICAO určuje standardní hodnoty tahu a časová období v režimu k ověřování spalování paliva a emisí. Předpokládá, že bez ohledu na typ letadla a motoru, vzlet probíhá za nastavení 100 % tahu po dobu 42 sekund, stoupání 85 % tahu po dobu 132 sekund, klesání 30 % tahu po dobu 240 sekund a pojíždění 7 % tahu po dobu 1 560 sekund. Pro udělení certifikace musí motor splňovat hodnoty průtoku paliva a emisní limity pro tyto tahy a časy.

Spalováním fosilních paliv vznikají odpadní látky, které mají dopad na životní prostředí. Spaliny tak mohou mít místní vliv, kdy ohrožují zdraví obyvatelstva v okolí letišť, a vliv globální, kdy plyny vypouštěné v troposféře a stratosféře podporují skleníkový efekt a ovlivňují klima planety. Plyny vznikající spalováním paliva jsou: oxid uhličitý (CO_2), oxid dusnatý (CO), oxid dusičitý (NO_2), vodní páry (H_2O), methan (CH_4), oxidy síry (CO_x) a saze. Z těchto plynů vzniká nevíce oxid uhličitý a vodní pára.

Skleníkový efekt je proces založen na rozdílné absorpci záření různé vlnové délky. Sluneční záření je tvořeno krátkými vlnami. Krátké vlny jsou propouštěny atmosférickými plyny a poté jsou absorbovány zemským povrchem. Země naopak radiací (sáláním) teplo vyzařuje ve formě dlouhých vln, které se od skleníkových plynů odráží zpět k Zemi. Přirozený skleníkový efekt je žádoucí, neboť je rozhodující pro zachování ideální teploty a života. Nicméně, lidským působením dochází k nárustu skleníkových plynů a k zesilování skleníkového efektu. Předpokládá se, že při současné úrovni znečišťování ovzduší vzroste průměrná teplota na Zemi do roku 2100 o 1,5 – 4,5 °C.

Oxid uhličitý – Atmosféra Země běžně obsahuje 78 % dusíku, 21 % kyslíku a 1 % ostatních plynů. Oxid uhličitý tvoří přibližně 0,04 %, přesná koncentrace závisí na místních podmínkách, výšce, vlhkosti aj. Existují plyny, které ovlivňují globální oteplování mnohonásobně více, nicméně CO_2 je zastoupen v atmosféře nejvíce a ve výsledku má největší vliv na skleníkový efekt způsobený člověkem. Vlivem lidské činnosti se jeho koncentrace zvyšuje. Za posledních 200 let se jeho koncentrace zvýšila o přibližně 30 %.

Letecká komerční doprava vyprodukovala roku 2019 celkem 918 mil. tun CO_2 a vytvořila nárůst o 29 % oproti roku 2013. Přibližně 85 % vytvořila doprava cestujících. Největší přispěvatelé jsou USA (s podílem 29 %), Evropská Unie (19 %) a Čína (13 %). Nárůst vyprodukovaného množství emisí CO_2 leteckou dopravou za posledních 7 let je zobrazeno na grafu č. 6, rozděleno podle podílu jednotlivých druhů letadel na úzkotrupé, širokotrupé, regionální, nákladní přepravu v osobních letounech a nákladní. [39, 40]



Graf 6. – Vznik emisí CO_2 podle druhu letecké dopravy [39]

Vodní pára – V zemské atmosféře je zastoupena asi 0,25 % a je druhým nejprodukovanejším plynem při spalování pohonných hmot. Atmosférický cyklus vodní páry je velmi komplikovaný proces a svým působením udržuje přirozené a stálé podmínky na Zemi, nicméně svou podstatou přispívá k zesilování skleníkového efektu nejvýrazněji ze všech plynů. Procentní podíl na skleníkovém efektu odpovídá 36-70 %. [39, 40]

3.3.1 Znečištění v okolí letiště

Znečištěné ovzduší je směsí pevných a tekutých částic, které vznikají provozem letadel, ale i podpůrnou technikou, dopravou a zdroji energie. Pevné částice rozlišujeme podle velikosti menší než 10 μm , které snadno proniknou do dýchacích cest, menší než 2,5 μm , které se mohou dostat až do plicních sklípků a ultrajemné částice, menší než 100 nm. Při dlouhodobém působení dochází k ohrožení zdraví toxickým působením, výskytu rakoviny a DNA poruchám. Kromě ovzduší dochází k znečišťování půdy a podzemních vod chemikáliemi používanými pro úpravu povrchu letadel a provozních ploch. Úniky paliva a maziv, čištění, odmrazování či chemické odstraňování plevelu představují operace, při kterých může dojít ke kontaminaci a ohrožení životního prostředí. Pro zmírnění rizika se zvyšuje kontrola nad jednotlivými operacemi, přechází se na čističe na vodní bázi, pro odmrazování se využívají nové technologické postupy (zahřívání infračerveným světlem, elektrické vyhřívání křídel). Agentura pro ochranu životního prostředí (Environmental Protection Agency – EPA) stanovila předpisy pro kontrolu odtoku dešťové a odpadní vody. Letiště má vybudovanou síť kanálů a potrubí pro sběr vody z letištní plochy s dostatečnými rezervoáry pro případ silných dešťů. Letiště podle možností samo zřizuje čištění vody nebo ji posílá do čistírny odpadních vod.

3.3.2 Vypouštění paliva

K vypouštění paliva dochází většinou pouze za určitých nouzových situací, kdy je třeba snížit váhu letounu na maximální přistávací hmotnost (Maximum Landing Weight – MLW) před nouzovým přistáním. K nouzové situaci může dojít ihned po vzletu, kdy je letadlo na své maximální vzletové hmotnost (MTOW). Vlivem závady či jiných obtíží je nutno s letounem přistát dříve než v cílové destinaci, letadlo přitom nestihlo spálit nadbytečné palivo a musí snížit hmotnost na MLW. Při překročení povolené hmotnosti může dojít k poškození konstrukce letadla při dosednutí a zvyšuje se riziko požáru. Proto je nutné vypustit palivo a snížit váhu. Proces vypouštění probíhá za kontroly řízení letového provozu, aby nedošlo k vypouštění pod výškou 1 800 m, ve vzdálenosti 8 km od nejbližšího letadla a nad neobydlenou zónou. Letecký petrolej je těkavý a jeho odpařování závisí na teplotě, tlaku a nadmořské výšce. Povolená výška, 1 800 m, zajistí, že se 90 % paliva vypaří před dopadnutím na povrch. Řízení letového provozu dále řídí dopravu v oblasti a odklání letadla od místa vypouštění o 9,3 km horizontálně a 6 100 m vertikálně. Postupem dle předpisů lze předcházet škodám na zdraví a majetku, neřeší ovšem znečištění ovzduší.

3.4 Snižování hluku a emisí

S rostoucím zájmem o dopady leteckého provozu na životní prostředí, pomalu ale jistě roste i snaha tyto dopady, pokud možno omezit, nebo alespoň zmírnit tempo jejich růstu. Velká pozornost je upřena na snižování spotřeby paliva, které lze dosáhnout řadou možností.

3.4.1 Konstrukce a technologie

Jednou z možností, jak snižovat spotřebu paliva je vývoj nových technologií a konstrukcí, které pracují s vyšší efektivností, zlepšují aerodynamické vlastnosti, snižují hmotnost konstrukce letounu a mnoho dalšího. Příkladem může být systém elektrického pohonu při pojíždění. Výzkumů probíhá celá řada a fungují na podobném konceptu. Elektromotor umístěný do kola hlavního podvozku je napájen z pomocné pohonné jednotky APU (Auxiliary Power Unit). Nejbližší k certifikaci má firma WheelTug se stejnojmenným výrobkem. Prozatím se uvažuje, že WheelTug bude použitelný pro letadla na střední tratě s MTOW od 20 tun výše, např. A321, Boeing 737 ad. Systém má dosáhnout větší manévrovatelnosti s pojížděcí rychlostí až $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Letadla budou moci zmenšit rozestupy a umožnit plynulejší provoz při výjezdu ze stání a při pojíždění po ploše letiště, neboť se nebudou vzájemně ohrožovat proudem výstupních plynů nebo sáním hlavních motorů. Dojde také ke zvýšení bezpečnosti pozemního personálu, možnost provádět servis a pracovní úkony v menší vzdálenosti od letadla a odpadne nutnost využívání pozemních tahačů, které vedou k občasnému poškození podvozku. Dle odhadů by mělo dojít k úspoře 300 až 2 500 dolarů na let. Z ekologického hlediska jsou výhody nepochybné, předpokládá se snížení spotřeby paliva během pozemního provozu o 80 %, snížení produkce emisí nejen od letadel, ale také pozemních vozidel a techniky. Dále dojde ke snížení hladiny hluku.

Technologie v současnosti prochází testy a certifikací FAA, nicméně firma předpokládá uvedení na trh již koncem roku 2021 a už nyní přijímá objednávky. Více konceptů budoucího vývoje je popsáno v následujících kapitolách. [41]



Obr. 6 – Přední kolo podvozku vybavené systémem WheelTug [41]

3.4.2 Provozní postupy

Jednou z možností, jak ovlivňovat spotřebu, je samotné řízení provozu. Úkol ATC spočívá v koordinaci letadel v jednotlivých fázích letu a navádění při provedení letu. Při letech může docházet ke zdržení, přehlcování dopravních uzlů nebo neefektivnímu trasování, což vede k vytížení letišť a nutnosti letadel vyčkávat na přistání a kroužit kolem letiště. Dochází tak ke zbytečnému spotřebovávání paliva. Například letadlo A320 Neo spotřebuje během kroužení 25 kg paliva za minutu.

Tomu má zabránit **projekt SESAR** (Single European Sky ATM Research) založen roku 2007. Systém umožňuje letadlům plánovat optimální trať bez výpočtu řízení letového provozu, zlepšuje komunikaci, zjednodušuje navádění ve všech fázích letu a zvětšuje předvídatelnost dopravních tras, což vede k plynulejšímu provozu na letišti bez nutnosti vyčkávat. Cíle projektu roku 2008 do roku 2020 byly: zkrácení letů o 8-14 minut, šetření paliva o 300-500 kg a zmenšení emisí o 950-1 575 kg CO₂. Součástí projektu je i systém i4D, který má za cíl analyzovat trajektorii letadel ve 4 dimenzích – zeměpisná šířka, zeměpisná délka, výška a čas. Systém procházel 2 roky

zkušební fázi, během které byl úspěšně použit pro navádění více než 20 000 letů. Během roku 2020 dokončil experimentální fázi a předpokládaný vstup do provozu byl během roku 2021 v řadě evropských zemí, nicméně je pravděpodobné, že z ekonomických důvodů kvůli pandemii COVID-19 dojde k odložení. Velmi podobný systém je NextGen (Next Generation Air Transportation System), který vzniká v rámci výzkumu FAA (Federal Aviation Administration). V současnosti probíhá implementace a předpokládá se, že plně nahradí současný systém do roku 2025. [42, 43]

Metoda plynulého klesání (CDA – Continuous Descent Arrival) je procedura, kdy letoun dostane povolení na přistání a klesá bez mezivýčkávání na povolení. Běžně pilot dostává povolení k sestoupení do výšky přibližně 950 m, kde musí vyčkat na povolení k přistání. Pro udržení výšky motory musí běžet v chodu a spotřebovávají palivo. Při využití metody CDA dostane pilot povolení již ve výšce 2 500 m, klesá do výšky 950 m na volnoběh, a až tady pilot spustí motory, aby mohl korigovat a přiblížit se na přistání pod úhlem 3° . Touto metodou dojde ke snížení produkce emisí a hluku v přistávací fázi letu a zkrátí se čas letu.

Další systém na navádění letadel **E-AMAN** (Extended Arrival MANagement horizon) umožňuje dřívější automatické sekvencování příletového provozu. Původní systém AMAN průběžně počítá trajektorie a časy přiletů letů na základě polohy a rychlosti letadel. Pracovní oblastí je TMA – koncová řízená oblast, naproti tomu E-AMAN rozšiřuje oblast působení a dokáže kalkulovat s mnohem vzdálenějšími letadly. Zlepšuje tak efektivitu a plynulost provozu, bezpečnost a snižuje ekologické dopady. [44]

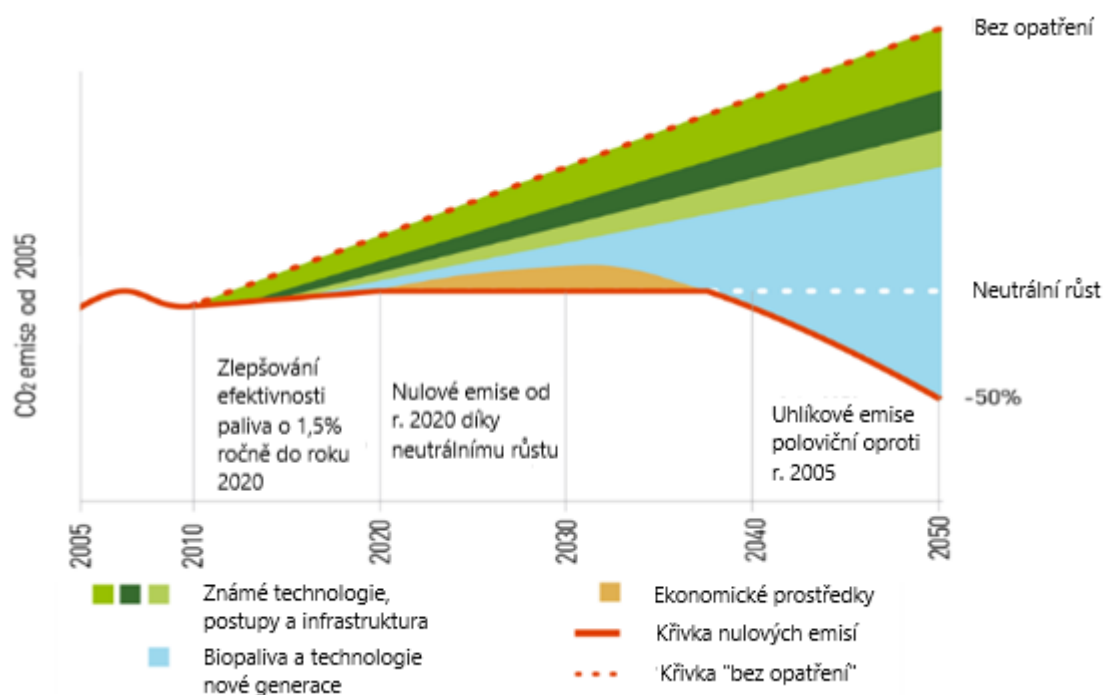
BUDOUCÍ VÝVOJ

4. BUDOUCÍ VÝVOJ DLE IATA DO ROKU 2050

Roku 2009 letecký průmysl odsouhlasil ambiciózní plán na zmírnění dopadů na životní prostředí za pomoci strategie založené na: vývoji technologie, zefektivnění leteckého provozu, zlepšení infrastruktury a ekonomických opatření. 3 hlavní cíle byly:

- ročně zlepšit efektivní využití paliva o 1,5 % mezi roky 2009 a 2020;
- neutrální růst uhlíkové produkce od roku 2020;
- zmírnit produkci uhlíkových plynů o 50 % do roku 2050 oproti 2005.

Následující graf č. 7 zobrazuje vývoj produkce CO₂ do roku 2050 za předpokladu stálého růstu a etapy pro udržení neutrálního růstu.



Graf 7. – Graf zobrazující předpokládaný vývoj produkce CO₂ emisí [45]

Od roku 2009 se udál velký technologický pokrok, který k těmto cílům přispívá. Předpokládá se postupný vývoj technologií do roku 2035, kdy se bude zdokonalovat stávající konstrukce letadel (trup-křídlo), výkony proudových pohonů, aerodynamika a materiály. Od roku 2035 se předpokládá využití nových revolučních konstrukcí a propulsních pohonů díky pokroku v technických oborech. Mezi nejslibnější konstrukce patří tvar samokřídla, křídla podepřená vzpěrami, dvojité tubusy a uzavřená křídla. Pro zdokonalení systému pohonu se uvažuje technologie otevřených rotorů, pohlcování mezní vrstvy a využití alternativních paliv nebo elektrického pohonu letadel, ať už poháněné formou naakumulované energie v bateriích nebo

s využitím hybridního motoru. K dalším požadavkům patří ekonomická a časová úspora na údržbu, rychlejší odbavování letadel, snížení hlučnosti a další.

Evropská komise vydala roku 2011 dokument **Flightpath 2050 – Evropská vize pro aviatiku**. V něm rozebírá cíle pro leteckou dopravu do roku 2050, mimo jiné snížení dopadů na životní prostředí a vývoj směrem k udržitelnému letectví:

- 75 % snížení produkce CO₂ na kilometr pasažéra oproti roku 2000;
- 90 % snížení produkce dusíkatých oxidů;
- 65 % snížení hlučnosti letadla;
- pojíždění letadel bez produkce emisí;
- recyklovatelné letadla;
- využívání obnovitelných paliv. [45, 81]

4.1 Vývojová technologie

Vývojová technologie se váže na vylepšování klasické konstrukce trup-křídlo. Současný postup splňuje zadaný cíl, ročně zvyšovat efektivitu o 1,5 % a snižovat produkci CO₂ na pasažéra o 2 %. Nicméně, okolo roku 2035 se předpokládá, že se tento trend bude zpomalovat. Další generace letadel má v zásadě stejnou konfiguraci jako předchůdci, liší se pouze v jednotlivých částech, viz tab. 2. V tabulce jsou uvedeny skupiny změn, koncept a procento ušetřeného paliva. Je vidno, že nejvyšší příspěvek k úsporám paliva tvoří skupiny aerodynamika, komponenty motoru a systémy. [45]

Skupina	Koncept	Ušetřené palivo
Aerodynamika	Proměnlivé prohnutí	1-2 %
	Riblets	1 %
	Winglet	3-6 %
Kabina	Odlehčený interiér	1-5 %
Materál a struktura	Pokročilé materiály	1-3 %
	Aktivní zmírnění zatížení	1-5 %
	Kompozitní primární	1-3 %
	Kompozitná sekundární	<1 %
	Nastavitelný podvozek	1-3 %

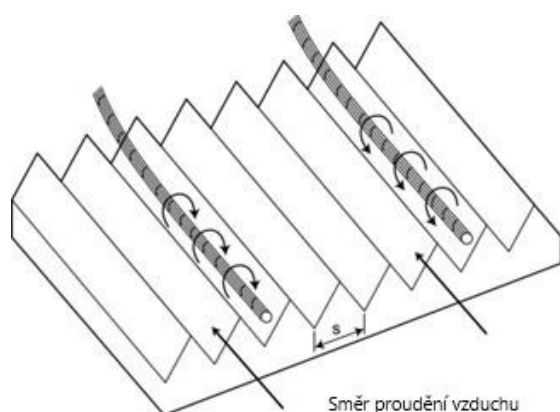
Systémy	Systém pojiždění	1-4 %
	Pokročilé Fly-by-Wire	1-3 %
	Monitoring struktury	1-4 %
Komponenty motoru	Úprava vrtule	2-6 %
	Vysoký obtokový poměr	2-6 %
	Pokročilá spalovací komora	5-10 %

Tab. 2 – Kategorie vývojových technologií [45]

4.1.1 Aerodynamika

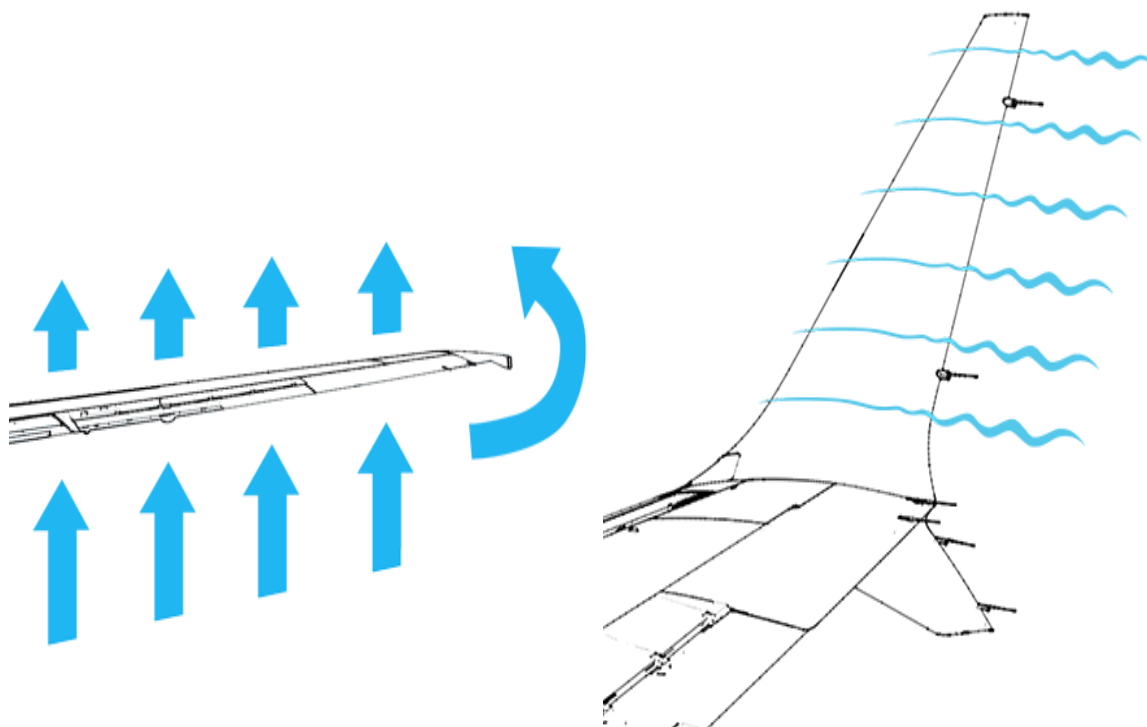
Výzkum aerodynamiky se zaměřuje hlavně tvorbu designu se sníženým odporem vzduchu. V posledních letech se nejvíce projevil v oblasti kontroly laminárního proudění. Tato technologie zabráňuje vzniku turbulentního proudění při proudění vzduchu okolo křídla, čímž významně snižuje odpor. Tato kontrola může vznikat pasivně nebo aktivně. Aktivní kontrola spočívá v sání mezní vrstvy k udržení laminárního proudění po povrchu křídla.

Pasivní kontrola se zajišťuje pomocí vhodného povrchu křídla nebo struktur na povrchu křídla. Do této kategorie spadají riblety a winglety. Při testech s těmito změnami bylo dokázáno, že lze dosáhnout až 10 % snížení třecího odporu a 4,5 % úspory paliva při letu do vzdálenosti 800 NM. **Riblety** (obr. č. 7) jsou tvořeny podélnými drážkami s velikostí pohybujících se v setinách až desetinách milimetrů. Jsou umístěny rovnoběžně se směrem proudění vzduchu a slouží k usměrnění toku a ke zmírnění odporové síly působící od turbulentní vrstvy. Riblety byly vyzkoušeny v provozu už roku 1996, kdy společnost Cathay Pacific Airways provozovala letoun A340, který byl pokryt plastovými riblety. Letoun byl v provozu 2,5 roku, během kterých se dosáhlo snížení spotřeby paliva o 3 % a zvýšil se tak zisk o 6 %. Nicméně, i přes tyto výhody se riblety do praxe nikdy nedostaly kvůli nízké životnosti plastového materiálu a finančním nárokům na udržování. [46]



Obr. 7 – Funkce ribletů [46]

Winglet je pomocná plocha na konci křídla. Slouží k usměrnění koncových vírů vznikajících na konci křídla. Tyto víry vznikají v důsledku vyrovnávání podtlaku nad křídlem a přetlaku pod křídlem a jsou zdrojem indukovaného odporu. Vertikálně umístěný winglet slouží k zabránění vyrovnávání tlaků na koncích křídel, čímž zajišťují nižší indukovaný odpor. Tato konstrukce dokáže snížit indukovaný odpor až o 20 % a celkový odpor o 5 %. Winglety se uplatňují v provozu už od roku 1977, poprvé byly využity na letounu LearJet 28. V současné době se vyrábí v různých variacích, od klasického Whitcombova wingletu, přes oboustranné zakončení až po nejmodernější dvojité šavlovitý winglet umístěný na letounu Boenig 737 MAX (obr. č. 8). Tento winglet dosahuje až 9 % snížení spotřeby paliva oproti letounům bez úprav konců křídel. Dále jsou vyvíjeny a testovány další modifikace, např. spirálovité a řízené winglety. [47, 48]



Obr. 8 – Působení vzduchu na běžně zakončené křídlo a křídlo vybavené Wingletem [47]

4.1.2 Komponenty motoru

U nových modelů letadel největší měrou k úspoře paliva přispívají změny u konstrukce motorů. U proudových motorů dochází ke zvyšování obtokového poměru, což je poměr u dvouproudých motorů mezi průtokem vzduchu vnějším (kolem jádra) a vnitřním (jádre) proudem. Poměr se pohybuje u dopravních letadel řádově mezi 3 až 7, u motorů s vysokým obtokovým poměrem je většina tahu vyvozena vnějším proudem vzduchu za jeho relativně nízkého urychlení. Nízká přidaná rychlost způsobuje i nižší množství potřebné dodané energie z paliva, proto je ekonomičtější vyšší obtokový poměr. Nové modely dopravních letadel, např.: A220, B737 MAX, Embraer E-Jet E2, aj. mají obtokový poměr mezi 9 až 12, což snižuje spotřebu paliva asi o 15 % oproti dřívějším modelům.

Zároveň jsou ve vývoji motory s novou architekturou, firma Rolls-Royce má rozpracované 2 nové typy, *Advance* a *UltraFan motor*. *Advance motor* představuje tříhřídelovou stavbu s vysokotlakým jádrem, u kterého se předpokládá snížení spalování pohonných hmot a produkci emisí CO₂ o 20 %. Pokročilejší *UltraFan motor* se skládá z vysokotlakého jádra a dvouhřídelová stavba je spojená s turbodmychadlem a převodovkou. Očekává se o 25 % nižší spotřeba. Firma Safran pracuje na konvenčním motoru s turbodmychadlem, ale s hodnotou obtokového poměru až 15, který by snížil spotřebu o 10 až 15 % oproti současné A320 Neo. Části motoru budou využívat lehčí a silnější kompozitní materiály, samotná turbína je zkonstruována z kompozitů s keramickou maticí. [49]

4.1.3 Systémy

Mezi vyvíjené systémy, které mohou ovlivnit spotřebu patří například elektrický systém pojiždění vyvíjený firmou WheelTug, již zmíněný v kapitole 3.4.1. Systém umožní, díky elektrickým motorům namontovaným na hlavních podvozkových kolech, pojiždět bez použití hlavních motorů nebo tažného vozidla. Zajímavou možností jsou palivové články, které vyrábějí elektrinu z chemické reakce kyslíku a plynného vodíku. Jsou tak šetrné k životnímu prostředí, odpadní látkou je teplo a vodní pára, články dále nevytvářejí žádný hluk. Palivové články by mohly nahradit APU a sloužit k napájení elektrických systémů, jako startování motorů, ventilace, osvětlení, řízení letu a další. Jsou schopné vytvářet velkou škálu výkonů, od wattů až po megawatty, ale zároveň jsou lehké a skladné. Přes řadu výhod je tu jeden problém, a to že potřebují pravidelnou dodávku vodíku jako paliva. Nejdříve by bylo třeba celosvětově začlenit do infrastruktury letišť dodávku vodíku, a až poté by byl tento systém dodávání energie skutečně uplatnitelný. [50, 51]

4.2 Revoluční technologie

V předchozí kapitole byly zmíněny vývojové možnosti pro skladbu letadla trup-křídlo, nicméně tato konfigurace se dostává na hranu svých možností. Proto je snaha přijít s alternativními

konstrukčními možnostmi, u kterých se předpokládá, že by se do provozu mohly dostávat od roku 2035. Řada světových firem v oblasti letectví pracuje na konceptech novelizace konstrukce letadel, pohonu, materiálů a struktur. Některé z těchto konstrukcí a možností budou rozebrány v následujících kapitolách.

4.2.1 Koncept samokřídla – Blended wing body

V dnešní době naprostou většinu letadel tvoří podobná konstrukce skládající se z dlouhého úzkého trupu sloužícího pro umístění nákladu a většiny systémů, křídel poskytujících vztlak, motorů poskytujících tah a stabilizačních ploch. Tento konstrukční model prošel dlouhým vývojem a je v současnosti ekonomicky nejvýhodnější. Z geometrického hlediska je výhodné mít těžiště umístěné pod křídly pro zajištění stability během letu. Problémem konstrukce jsou aerodynamické vlastnosti. Vzájemnou pozicí trupu a křídla dochází ke vzniku interferenčního odporu a třetího odporu po celém povrchu. Proto vznikl koncept samokřídla nebo podobná konstrukce V-letounu, které je tvořeno pouze křídlem bez trupu. Konstrukce by ideálně měla pojmout posádku, náklad, motory a všechna nezbytná zařízení tak, aby nedošlo k narušení siluety křídla a dosáhla co největší aerodynamické čistoty letounu. Takto zkonstruovaný letoun by mohl ušetřit až 20% paliva. Oproti běžným letounům skládajících se z trupu a křídel má samokřídlo výhodu, že vztlak působí po celé ploše letounu. Dalšími výhodami jsou menší napětí působící v konstrukci, menší odpor, menší hmotnost a s tím spojená úspora paliva, dále při umístění pohonu nad křídlo dojde k zabránění šíření hluku směrem k zemi. Nevýhodou je, že při absenci ocasních ploch je let nestabilní a je proto nutné vybavit nosné plochy auto-stabilním profilem nebo vyvažovacími klapkami, které poskytují podélnou stabilitu.

První vyrobené prototypy samokřídla byly vyrobeny během 2. světové války. Vznikly prototypy Horten Ho 229 a Baynes Bat. Horten Ho 229 byl německý stíhací letoun vybavený proudovými motory, nicméně k dokončení nikdy nedošlo. Britský Baynes Bat měl umožnit vzdušnou přepravu tanků. Byl vyroben prototyp, ale reálně využit nebyl. V následujících letech došlo k dalším experimentům se samokřídly, ale nikdy nebyly úspěšné v důsledku špatné manévrovatelnosti a stability. Prvním úspěšným letadlem byl americký strategický bombardér Nortrop Grumman B-2 Spirit. Do civilního letectví začal koncept trupu ve tvaru křídla pronikat až v posledních letech. Airbus představil model MAVERIC (Model Aircraft for Validation and Experimentation of Robust Innovative Controls) roku 2020 v Singapuru. [52]

B-2 Spirit

Tento letoun absolvoval první let 17. července 1989. Konstrukce letounu byla postavena z uhlíkových kompozitů a využívala technologii stealth proti radarové technice. Technologie radaru pracuje na principu odrazu vln. Radar vyšle krátké impulsy elektromagnetické energie v určeném směru a anténa okamžitě přepne do přijímacího modu pro přijetí odražených vln od vzdáleného objektu. Indikátor radaru zobrazí velikost, směr a vzdálenost objektu od vysílače. Technologie stealth se snaží tuto praktiku narušit využitím správné konstrukce. B-2 má rozpětí

křidel 52 metrů, a přesto se zobrazuje na radaru v průměru cca 0,5 metru. Tento výsledek byl dosažen hlavně díky konstrukci povrchu letounu, který většinu elektromagnetických vln odrazí do jiného směru než zpět k radaru. Při navrhování B-2 se dbalo na každý detail pro vyhnutí se detekci radaru. Jedním z nejzajímavějších prvků letounu je nepřítomnost ocasních ploch, tím postrádá možnost kontroly zatačení kolem svislé osy z. Namísto toho používá pouze křídélka na koncích křidel jako vzdušné brzdy a způsobuje tak zatačení. Kromě samotné konstrukce a tvaru je povrch vyroben z pokročilých uhlíkových kompozitů, které mají schopnost absorbovat část příchozích radarových vln. Dále je povrch ošetřen barvou obsahující malé částice železa, které přeměňují část elektromagnetických vln na tepelnou energii. Díky kombinaci všech těchto technologií je B-2 obtížně detekovatelná pro přijímač radaru. Kvůli technologické náročnosti se cena jednoho letounu pohybovala okolo 1,15 miliardy dolarů, a proto se vyrobilo pouze 21 kusů.

Schopnost letounu proniknout i ke střezným cílům a dolet cca 12 000 kilometrů z něj tvoří jeden z nejnebezpečnějších strojů. Přestože nemá vlastní zbraňové prvky, je schopné unést 18 000 kilogramů výbušnin. Poprvé byl využit k armádním účelům během války v Kosovu v operaci Spojenecká síla, dne 24. března 1999. Během přeletu z domovské základny v Missouri do Kosova dva letouny shodily 32 pum. Tento let trval 31 hodin během kterých bylo třeba několikrát doplnit palivo za letu. Celkem byl během války v Kosovu využit k 50 náletům z celkových 34 000, přičemž dokázal zničit asi třetinu z celkových cílů. Další využití našel během války v Afganistánu v operaci Trvalá svoboda. Tento nálet trval 44 hodin, čímž se řadí na první místo v nejdelší letové bojové operaci. Během všech armádních operací nikdy nedošlo k sestřelení letounu, pouze jednou došlo k havárii. Roku 2008 kvůli vlivu vlhka na senzoriku došlo k nesprávné indikaci rychlosti a úhlu náběhu, následkem čehož se letoun přiblížil k zemi, kde havaroval. Oba piloti se stihli katapultovat před nárazem a nehodu přežili.

Letouny B-2 původně měli sloužit až do roku 2058, čímž by se dostaly na provozní dobu 70 let. Jelikož ale technika postupuje rychle kupředu bylo rozhodnuto o vyřazení roku 2032, poté by je měly nahradit nové letouny verze B-21, které by měly mít funkční prototypy roku 2023. [63]

4.2.2 Koncept křidel podepřených vzpěrami – Strut–braced Wing

Křídla podepřená vzpěrami byla využita již dříve, nicméně s pokrokem v materiálech je možné dosáhnout stejné pevnosti na úkor hmotnosti křidel. Vzpěry umožňují delší rozpětí při snížení působícího ohybového momentu. Při větším rozpětí dojde ke zmenšení indukovaného odporu, který vzniká prouděním vzduchu po profilu křídla. S menším odporem není potřeba vyvinout tak velký tah, a tím je možné cestovat s menšími a lehčími motory.

Letadlo, navržené firmou Boenig ve spolupráci s NASA v rámci výzkumu *Subsonic Ultra Green Aircraft Research* (SUGAR), mělo plnit požadavky redukce hluku o 71 dB oproti FAA standardům a více než 70 % menší spotřeba pohonných hmot. V současnosti se výzkum nachází ve své Volt fázi. V předchozí fázi se výzkum soustředil hlavně na aspekty konstrukce křidel podepřenými vzpěry. V dalších fázích se výzkum zaměří na přizpůsobení designu cestování

rychlostí 0,8 Mach, na zjišťování charakteristik křídla za nízké rychlosti a na vývoj pokročilých technologií. Jednotlivé fáze:

- SUGAR High – konstrukce křídla širokého rozpětí, s vysokým poměrem vztlak k odporu by měla zajistit úsporu paliva o 8 % oproti běžným konzolovým křídům. Dále křídla umístěná na vrchu trupu umožňují efektivnější vestavění motorů s otevřenými rotory o větším průměru;
- SUGAR Volt – koncept hybridního elektrického dopravního letadla. Využití obnovitelných zdrojů energie (vítr, solární energie...) může nahradit část energie získanou z paliva, a tak snížit produkci emisí;
- SUGAR Freeze – obsahuje technologie využívající zkapalněný zemní plyn, palivové články, kryogenicky chlazené elektromotory, pokročilejší skladování energie v bateriích a technologii pro pohlcování mezní vrstvy. [53]

4.2.3 Koncept uzavřených křídel – Box-Wing

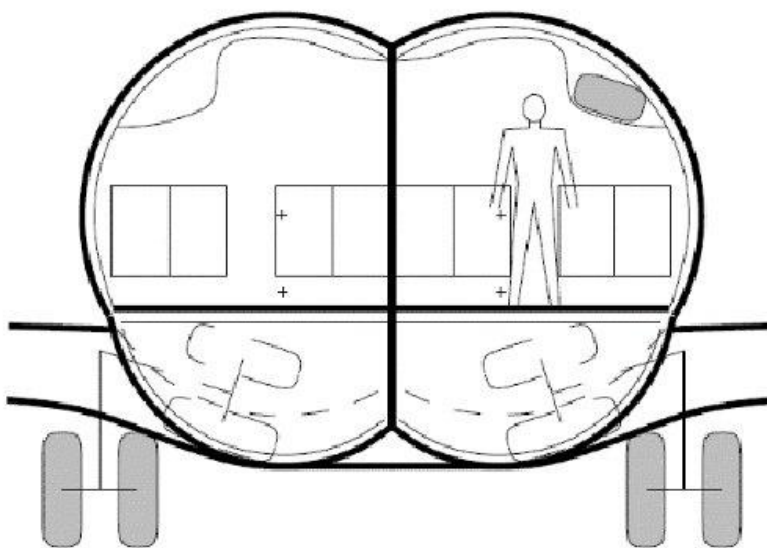
Koncept uzavřených křídel spojuje konce hlavních křídel, případně spojuje křídla s konci horizontálních ocasních ploch. Touto konstrukcí se sníží indukovaný odpor, zvýší se klouzavost a dojde ke snížení spotřeby paliva. Podle konfigurace konstrukce (rozpětí, výškový rozdíl, umístění na trupu...) se zajistí rozdílné působení sil a momentů potřebných pro stabilitu a kontrolu letu. Nevýhodami konstrukce jsou větší působící síly, proto se uvažuje se zesílenou konstrukcí s větší hmotností. Dále výrazně menší palivové nádrže v křídlech, obtížně splnitelné vztlakové koeficienty pro přední část křídla, nemožnost umístění motorů a přistávacího podvozku na křídlech a neschopnost jednoduše vytvořit prodloužené nebo zkrácené verze letounu z důvodu rozdílného působení sil a umístění těžiště. [54]



Obr. 9 – Příklad konstrukce box – wing letounu [80]

4.2.4 Koncept dvojitého tubusu – Double-bubble fuselage

Koncept fungující na podobném principu jako samokřídlo. Spojením dvou tubusů do jednoho trupu vznikne zploštělý trup poskytující další přidáný vztlak. Běžně má trup kruhový průřez, protože lépe odolává zatížení, při nekruhových průřezích by docházelo k silnějším ohybovým zatížením. Geometrie double-bubble využívá protínající se kruhy svázané k podlaze trupu, aby bylo dosaženo efektivní struktury, kde jsou všechny prvky kabiny napnuté. Podlaha funguje jako příčný nosník a pomáhá snášet tlakové zatížení. Dvojitý tubus se většinou používá u nákladních letadel se 2 protínajícími se kruhy nad sebou, což poskytuje větší prostor pro nákladní dopravu. Tubusy umístěné vedle sebe by výrazně rozšířily kapacitu cestujících. Problémem jsou koncentrátoři napětí, které by mohly ohrožovat bezpečnost a spolehlivost. [55]

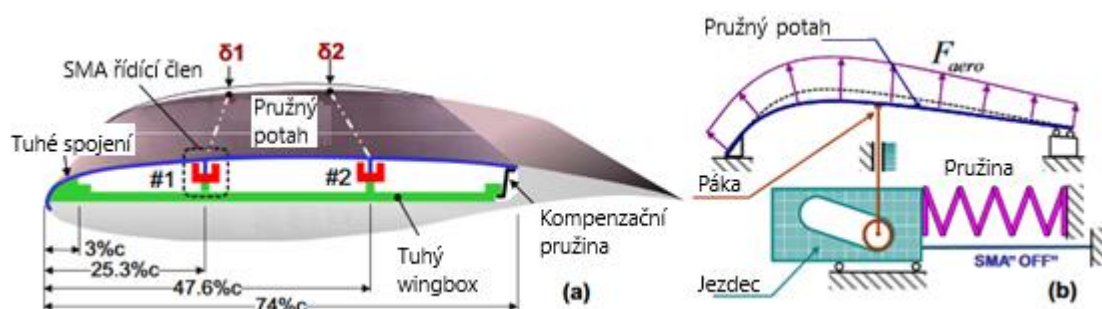


Obr. 10 – Příklad konstrukce dvojitého tubusu [55]

4.2.5 Technologie využívající pokročilé materiály

I když se v současnosti dosáhlo výrazného snížení hmotnosti letounu díky použití kompozitních materiálů a lehkých slitin, jsou ve výzkumu další možnosti. NASA ve svém výzkumu Spanwise Adaptive Wing (SAW) zkoumá materiál, který je schopen vrátit se do původního tvaru působením zvýšené teploty. Používá k tomu paměťovou slitinu nikl-titanu (SMA – Shape Memory Alloy). SMA bylo poprvé použito v americkém stíhacím letounu F14 v roce 1969 v hydraulickém systému na potrubí. Potrubí se propojilo na nerozebíratelný spoj pomocí nalisování dvou součástí o různé teplotě. Od té doby se díky své spolehlivosti dostalo do mnoho dalších částí letadla. Uvažuje se o budoucím využití pro konstrukci křídla a trysek. Konstrukce systému by se skládala ze 4 částí: materiálu SMA, snímacích prvků, hnacích prvků a řídicí jednotky. Působením soustavy by se geometrický profil přizpůsoboval jednotlivým fázím letu a měnil působící síly. Na obrázku č. 11 (obr. a – 2 hnací prvky, obr. b – 1 hnací prvek) je znázorněný profil křídla využívající

technologii SMA. Pružný potah je napojen na systém pák a převodů, které pracují v závislosti na změnách SMA, a mění tak tloušťku profilu v řádech milimetrů. Využitím změny tvaru trysky v proudových motorech lze docílit snížení hluku během vzletu a během letu vrátit původní tvar, aby nedocházelo k snižování výkonu motoru.



Obr. 11 – Konstrukce křídla schopná měnit prohnutí profilu [57]

Další technologii měnícího se profilu křídla zkoumá NASA ve spolupráci s MIT. Mechanismus proměny by sestával z celého křídla, které by bylo zakryto potahem vyrobeným z překrývajících se kusů připomínajících šupiny. Schopnost deformovat tvar křídla by zvýšila účinnost letu a tím snížila spotřebu paliva. Zkoušky této konstrukce v aerodynamickém tunelu navíc ukázaly, že odpovídá aerodynamickým vlastnostem konvenčního křídla přibližně při jedné desetině jeho hmotnosti. [56, 57]

4.2.6 Koncepty pohonů

Předpokládá se, že nové typy pohonů budou mít v následující generaci dopravních letadel výrazně vyšší úsporu paliva. Hlavní 3 technologické koncepty pro motory jsou propfan konstrukce, elektromotor a využití nasávání mezní vrstvy.

4.2.6.1 Propfan rotor – Open rotor

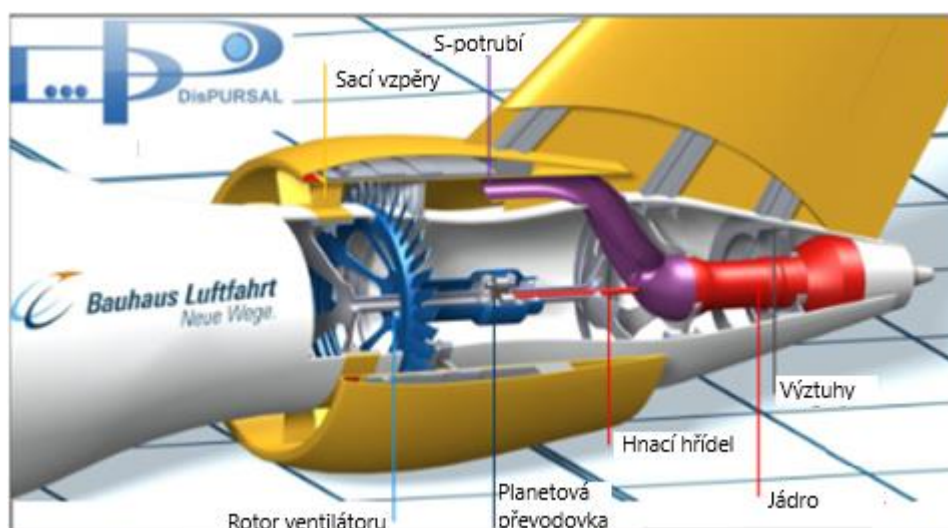
Propfan rotor je kombinace turbovrtulového a turbodmychadlového motoru. Vyznačuje se 2 protiběžnými nezakrytými vrtulemi. Vrtule jsou poháněny jednou turbínou, ale díky reverzoru se točí proti sobě. Propfan je efektivnější než oba zmíněné, umožňuje snížit spotřebu paliva a produkci emisí o přibližně 15 % oproti současným turbodmychadlovým motorům. Vývoj motoru probíhal během ropné krize od 70. let 20. století, dostal se i do komerčního provozu, nicméně byl jeho vývoj zpomalen a upozaděn po konci ropné krize, kvůli vyšší hlučnosti a vyšším nákladům na výrobu a údržbu. Znovu se začalo uvažovat o jejich využití během přelomu tisíciletí vlivem výkyvů cen ropy, růstem tlaku na ekologičnost letecké dopravy a díky novým výpočtovým technologiím. Firma Safran v rámci projektu Clean Sky vyvíjí motor typu propfan od roku 2008, během let 2015-2017 vytvořili prototyp motoru a podrobili ho zkouškám ve větrném tunelu a pozemním testům. Analýzy provedené od té doby ukazují snížení reálné spotřeby paliva a produkci emisí o 15 % oproti současným motorům. Využití se předpokládá kolem roku 2030 až 2035. [59]



Obr. 12 – Fotografie pozemní zkoušky propfan motoru firmy Safran [58]

4.2.6.2 Propulsive Fuselage Concept – Nasávání mezní vrstvy

Jedná se o systém integrovaný v zadní části trupu letounu před vstupem do motoru, kde slouží k nasávání mezní vrstvy. Skládá se z jednoho či dvou prstenců lopatek rotujících kolem trupu elektricky poháněných generátory od motorů na křídlech. Prstence nasávají mezní vrstvu vzduchu, tím zmenšují tloušťku vrstvy a snižují tak působící povrchový odpor, zvětšují průřez obtokové plochy a urychlují vzduch na vstupu do motoru. Motor umístěný v zadní části tento vzduch dále urychluje a způsobuje tak tah. Koncept je zkoumán více firmami: Bauhaus Luftfahrt, MIT, NASA. Běžná konfigurace, motory umístěné na křídlech, má výhodu, že proud vzduchu vstupující do kompresoru motoru je nerozrušený a působí rovnoměrně na všech lopatkách vrtule. Oproti tomu, při umístění motoru na konec trupu dochází k nárazům a rozrušování větru. To způsobuje větší namáhání a rychlejší opotřebení částí motoru. Je snaha tento proud vzduchu usměrnit, neboť systém má velký potenciál. Při testech ve větrných tunelech bylo dokázáno, že úspora energie se přibližuje 10 až 15 %. [61]

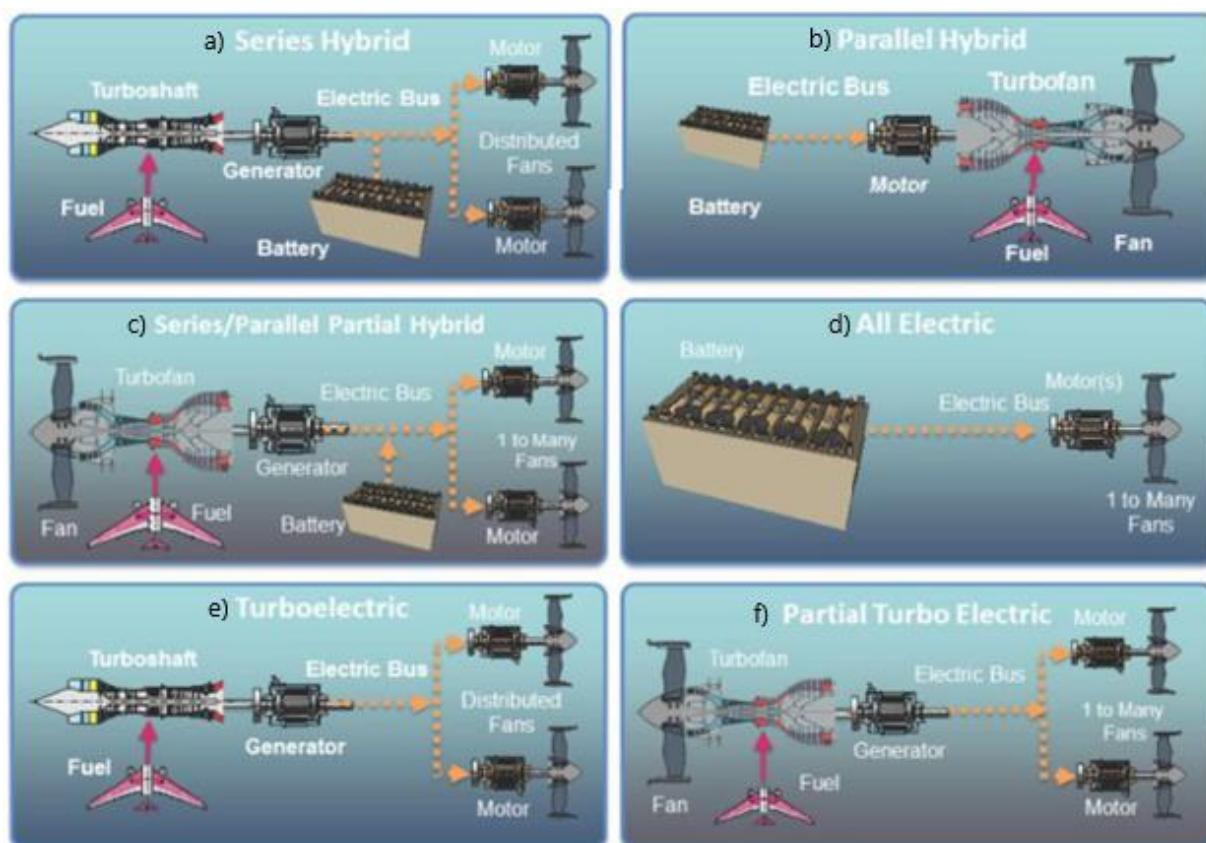


Obr. 13 – Vnitřní konstrukce propulsního systému [60]

4.2.6.3 Elektromotory

Idea elektrických motorů se dostává stále více do popředí, díky tomu, že neprodukují žádné emise při provozu. Předpokládá se, že do roku 2050 budou mít hlavní roli pro dodržení cílů na ochranu životního prostředí. Největším problémem v této vizi může být zajištění dostatku alternativní elektřiny a v jejím uskladnění během provozu. Uvažuje se o 6 hlavních konceptech pro elektromotory:

- elektrický systém (d) – spoléhá se pouze na baterie pro dodání hnací síly;
- paralelní hybrid (b) – dmychadlo umístěné na hřídeli může být poháněno turbínou i elektromotorem zároveň, nebo pouze jedním zdrojem;
- sériový hybrid (a) – dmychadlo je poháněné pouze elektromotorem, turbína pomocí generátoru nabíjí baterie;
- paralelní/sériový hybrid (c) – jedno nebo více dmychadel je poháněno přímo turbínou, zbytek dmychadel je poháněno elektromotory;
- plně turbo elektrický systém (e) – neobsahuje baterie, turbína je napojena na generátor a produkuje stejnosměrný proud, který pohání elektromotory;
- částečně turbo elektrický systém (f) – část hnací energie generuje elektrický pohon, část zajišťuje turbodmychadlo poháněné plynovou turbínou.



Obr. 14 – Koncepty motorů využívajících elektrický zdroj [62]

Hybridní elektrická letadla, kombinující inovativní elektromotory a spalovací motory, jsou v blízké budoucnosti považována za velmi účinnou náhradu konvenčních letadel krátkého a středního doletu. Mnoho velkých společností v leteckém průmyslu investuje do této technologie, např: Airbus, Siemens, Rolls-Royce, Boeing a další. [62]

4.3 Budoucí prototypy letadel

Na následujících stránkách je vybráno několik vznikajících prototypů a projektů, využívajících pokročilých technologií a konstrukcí.

4.3.1 MAVERIC

Francouzský výrobce letadel Airbus představil poprvé veřejnosti MAVERIC (Model Aircraft for Validation and Experimentation of Robust Innovative Controls) v Singapuru 11. února 2020. Tento model letounu je zvláštní tím, že má křídla napojená rovnou na trup, čímž je zajištěna mnohem lepší aerodynamika, ale na úkor složitosti ovládání. Bylo by to první dopravní letadlo tohoto druhu. Podle výkonného viceprezidenta společnosti Airbus, Jean-Brice Dumonta, je toho možné dosáhnout díky technologickému pokroku ve výrobě lehčích materiálů a výkonnější výpočetní technice. Prozatím byl otestován model s délkou 2 metry a rozpětím křídel 3,2 metry.

Poprvé vzlétl červnu 2019. Model vznikl během 3 let v rámci projektu Airbus UpNext se sídlem v Toulouse. Tato část firmy se zabývá vývojem budoucích technologií letectví a jejich uplatněním v provozu.

Samotný model byl postaven s precizností jako skutečné letadlo a také musel projít všemi potřebnými testy. Ve větrném tunelu se zkontrolovaly aerodynamické charakteristiky, jak se model chová za nízké rychlosti, za pádové rychlosti, charakterizovat brzdou dynamiku, stabilizaci a řízení. Z testů vyplynulo, že konstrukce samokřídla může ušetřit až 20 % paliva v porovnání s tubusovým letounem se stejným motorem. Větší konstrukce letounu dává možnost integrovat jiné typy pohonných systém, při umístění motoru v horní centrální části dojde také ke snížení hluku působícího na zem. Větší konstrukce zpříjemní cestu pasažérům otevřenějším prostorem. Mezi nevýhody se řadí nedostatečná stabilita v podélné i svislé ose. Toto je třeba řešit pomocí počítačů, které dbají na bezpečný režim letu a samy letoun stabilizují. Další nevýhodou je rozložení hmoty a cestujících. Během naklánění se letoun může dostat do 30° náklonu. V tubusových letounech je cestující vzdálen od podélné osy maximálně 3 metry, ale v novém letounu bude vzdálenost větší a na cestující bude působit větší obvodové zrychlení, které může vyvolat nepříjemné pocity. Možným řešením je zpomalit naklánění, a tak zvětšit poloměr zatáčky.

Toto letadlo je zatím jen ve fázi výzkumu a není jisté, že se vůbec někdy dostane do provozu. Samotný výzkum a vývoj nových technologií dopravních letadel je nákladná záležitost, a aby se investice vyplatila, musí výsledek přinést zisk. Kromě technologického výzkumu je nutné přebudovat samotné provozování, vyřešit systém nástupu a výstupu cestujících, zabezpečení, pohodlnost a rozvržení sedadel pasažérů a další. Odhadnout všechny možnosti nových technologií není nic snadného a za současného stavu je pro společnosti ještě více riskantní investovat do nejistých výsledků. [64, 65]



Obr. 15 – Model letounu MAVERIC [64]

4.3.2 E-FAN X

Prototyp hybridního letounu vznikl od roku 2017 ve spolupráci firem Airbus, Rolls-Royce a Siemens, a ač byl prototyp takřka dokončen a první let byl naplánován na rok 2021, tak v dubnu 2020 byl program zrušen z důvodu pandemie COVID-19. Letoun měl jeden ze čtyř turbovrtulových motorů nahrazen 2 megawattovým elektromotorem. S kapacitou 50-100 pasažérů měl létat regionální a krátké trasy od roku 2035. [66]



Obr. 16 – Prototyp letounu E-FAN X [66]

4.3.3 STARC – ABL

Koncept vznikající pod vedením NASA se zaměřil na částečný turbo elektrický pohon fungující zároveň se systémem nasávání mezní vrstvy pro snížení odporu. Letoun s kapacitou 150 pasažérů, doletem 3 500 NM a tradiční stavbou trup-křídlo by měl překlenout mezeru mezi současnými letadly poháněnými spalovacími motory a budoucími celoelektrickými letouny. Pohon zajišťují 2 tradiční proudové motory umístěné pod křídly a 1 elektromotor napájený elektřinou z generátorů plynových turbín. Celkově by podle odhadu měly proudové motory na křídlech dodávat při vzletu 80 % a při letu 55 % tahu, zbylá procenta by dodával elektromotor na konci trupu. Celkově by pohon mohl dosáhnout úspory paliva 10 %. S uvedením do provozu se uvažuje mezi roky 2035 a 2040. [62, 66, 67]



Obr. 17 – Koncept letounu STARC – ABL [68]

4.3.4 WRIGHT 1

Koncept čistě elektronického letounu. Akumulátorová letadla dosahují nejvyššího možného snížení emisí CO₂ a nejvyšších přínosů pro životní prostředí. Některé společnosti v současné době pracují na konstrukci a vývoji letadel poháněných bateriemi. Je však pravděpodobné, že budou potřebovat více času až do uvedení do provozu než srovnatelná hybridně-elektrická letadla. Jedna ze společností, Wright Electric, pracuje na projektu WRIGHT 1. Design společnosti Wright Electric je založen na distribuovaném pohonu, s počtem 10-14 elektromotorů integrovaných v křídlech, a na bateriích, které lze snadno vyměnit během údržby na letišti. Letoun by měl pojmout 186 cestujících a schopen dvouhodinového letu na vzdálenost 560 km. Pohon by tvořil elektrický motor o výkonu 1,5 MW, který by se měl začít testovat během roku 2023. Samotný letoun by se mohl objevit v provozu roku 2030. [69, 70]



Obr. 18 – Koncept letounu WRIGHT - 1 [70]

4.3.5 AURORA D8

Na projekt pracují ve spolupráci firmy Aurora Flight Sciences, MIT, NASA a Pratt & Whitney od roku 2008. Konstrukce je tvořená dvojitým trupem zakončeným dvojitým vertikálním stabilizátorem. Pohon, využívající technologii pohlcování mezní vrstvy, tvoří 3 motory připevněné k ocasu trupu a tím pádem samotná křídla mohou být menší a lehčí. U letounu se předpokládá cestovní rychlost 0,74 M, kapacita pasažérů 180 a dolet 3 000 NM. Předpokládaná doba zprovoznění je 2030-2035. [71]



Obr. 19 – Koncept letounu AURORA D8 [71]

4.3.6 N3-X

V rámci NASA vzniká spousta možných projektů kombinujících různé technologie. Jeden z nejpokrokovějších je N3-X, prozatím ve fázi počítačových simulací. Využívá konstrukci samokřídla, s elektromotory pohánějící větší množství vrtulí rozmístěných podél zadní hrany křídla. Energie je dodávána 2 generátory poháněnými turbohrádelovým motorem umístěnými na každém konci křídel. Generátory jsou připojeny k pohonům prostřednictvím chlazených supravodivých elektrických vedení. Předpokládaná kapacita je 300 pasažérů, dolet 7 500 NM a cestovní rychlost 0,84 M. [72]



Obr. 20 – Koncept letounu N3-X [72]

4.4 Možnosti alternativních paliv

Mezinárodní panel pro změnu klimatu 2015 (Intergovernmental Panel on Climate Change) dospěl k rozhodnutí, že bez naléhavých patření bude mít změna klimatu závažné a nevratné dopady po celém světě. I když se produkce CO₂ při spalování snižuje o přibližně 1,5 % ročně na jednoho pasažéra, tak velikost letadlových flotil roste o 4 % ročně. S touto statistikou se předpovídá, že by se podíl leteckého průmyslu v produkci emisí zvětšil na 19 %.

U leteckého paliva rozlišujeme letecký petrolej (kerosin) a letecký benzin. Letecký petrolej je znám také pod označením Jet A-1, což je specifická verze petroleje, určeného coby palivo moderních reaktivních (proudových) a turbovrtulových motorů (turbopropch). Cena leteckého petroleje je nižší než leteckého benzínu a pohybuje se včetně spotřební daně a DPH na částce 30 až 32 korun za jeden litr. Naproti tomu letecký benzin je určený pro pístové motory, používané u menších letadel. Cena na zákazníka je u leteckého benzínu vyšší, přibližně od 50 korun za litr.

Využívání alternativních paliv by mohlo hrát důležitou roli při omezování spotřeby fosilních paliv, snižování emisí skleníkových plynů a ochraně životního prostředí. Palivo je jedním z největších provozních nákladů pro letecký průmysl a IATA očekává, že do roku 2030 bude 30 % podíl biopalivového složky v palivu. Všechny složky v leteckém průmyslu se snaží zavést nová opatření a řešení k dosažení cílů, které vlády a organizace stanovily za účelem zlepšení změny klimatu. V současnosti je vyvinuto úsilí na výrobu biopaliv šetrnějších k životnímu prostředí. Kromě biopaliv je řada výzkumů zaměřená i na další alternativní paliva, např: vodík, amoniak či deriváty alkoholu.

Letecké palivo musí splňovat řadu kritérií na kvalitu, aby zajistilo požadovanou bezpečnost a efektivnost při letu. S růstem dopravy obecně, roste i spotřeba fosilních paliv a zároveň klesají zdroje. Letecká doprava již několik let využívá přimíchávání alternativních paliv. Tato složka se vyrábí z obnovitelných zdrojů a přimíchává do leteckých paliv. Dle způsobu výroby a vlastností je můžeme rozdělit na **syntetická, obnovitelná a nemísitelná**. Označení biopalivo je pouze u paliv vyrobených z biomasy a biologického odpadu. [74, 76, 77]

4.4.1 Syntetická paliva

Syntetická paliva jsou vyráběna metodou zvanou Fischer-Tropsch. Základním materiálem může být uhlí, plyn nebo biomasa. Paliva na této bázi jsou volně mísitelná se současnými palivy. Syntetická paliva mají vynikající vlastnosti, někdy dokonce lepší než současná paliva. Nicméně výroba z neobnovitelných surovin (uhlí, zemní plyn) není dlouhodobým řešením. Výzkum je zaměřen na vývoj biologického paliva vyráběného z rostlin odstraňujících CO₂ z atmosféry.

4.4.2 Obnovitelná paliva

Mezi obnovitelné letecké paliva patří paliva na bázi bio-dieselu, bio-paliva získané pyrolýzou zkapalněné biomasy a paliva na bázi alkoholu získaná hydrolýzou a fermentací. Tyto paliva jsou plně mísitelná s konvenčními palivy. Paliva jsou většinou vyráběna z bio-olejů.

4.4.2.1 Biopaliva

Biopaliva rozdělujeme na 4 generace dle výrobní suroviny:

- polysacharidy a olejniny;
- lignocelulozové zbytky;
- vodní řasy a mikroorganismy;
- výroba elektřiny chemickou reakcí.

Zda, a případně o kolik, biopaliva snižují produkci skleníkových plynů, stále zůstává předmětem sporů. Faktem je, že při výrobě biopaliv je třeba dodávat nezanedbatelné množství energie a zdrojů. Mezi obnovitelná letecká paliva patří kromě paliv na bázi bio-dieselu, také právě vyvíjené bio-paliva získané pyrolýzou zkapalněné biomasy.

V Evropské unii dlouhodobě roste podpora produkce biopaliv, to se ale změnilo v září 2007, kdy Organizace pro hospodářskou spolupráci v Evropě (OECD) začala tento trend kritizovat. Podle OECD vede k prudkému růstu cen potravin a potenciálně i k devastaci přírody. V září 2012 uvedla agentura Reuters návrh legislativy z Bruselu, ve které eurozóna omezí používání biopaliv založených na zemědělských plodinách, protože se obává, že tato jsou méně šetrná k životnímu prostředí, než se předpokládalo. Výbor pro životní prostředí, veřejné zdraví a bezpečnost potravin Evropského parlamentu omezila podíl biopaliv na 5,5 %.

Problémů při pěstování biomasy pro biopaliva je celá řada. Při spalování bionafty dochází k podstatně větší produkci pevných částic menších než 1 mikrometr, dále oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO₂), oxidu dusičitého (NO₂) i oxidu siřičitého (SO₂). Pěstování probíhá na velkých plantážích, čímž významně ubývá biodiverzity. Používáním pesticidů a hnojiv dochází k zamořování spodních vod. Vysoká neefektivnost – na výrobu 1 litru biopaliva je spotřebováno až 2 500 litrů vody, během každé fáze produkce jsou využívána fosilní paliva a malá energetická výtěžnost.

4.4.2.2 Deriváty alkoholu

Podobně jako biopalivo lze do paliva přimíchávat deriváty alkoholu – nejčastěji methanol, ethanol a dimethylether (DME). Jejich podíl může tvořit až 20 % pro běžná paliva. V letectví se uplatňuje hlavně ethanol, který nejlépe splňuje technické nároky. Čistý ethanol se v letectví nepoužívá jako palivo, většinou se smíchává s běžnými minerálními palivy s podílem až 10 %. Díky ethanolu se zvyšuje oktanové číslo a snižuje se množství emisí CO₂.

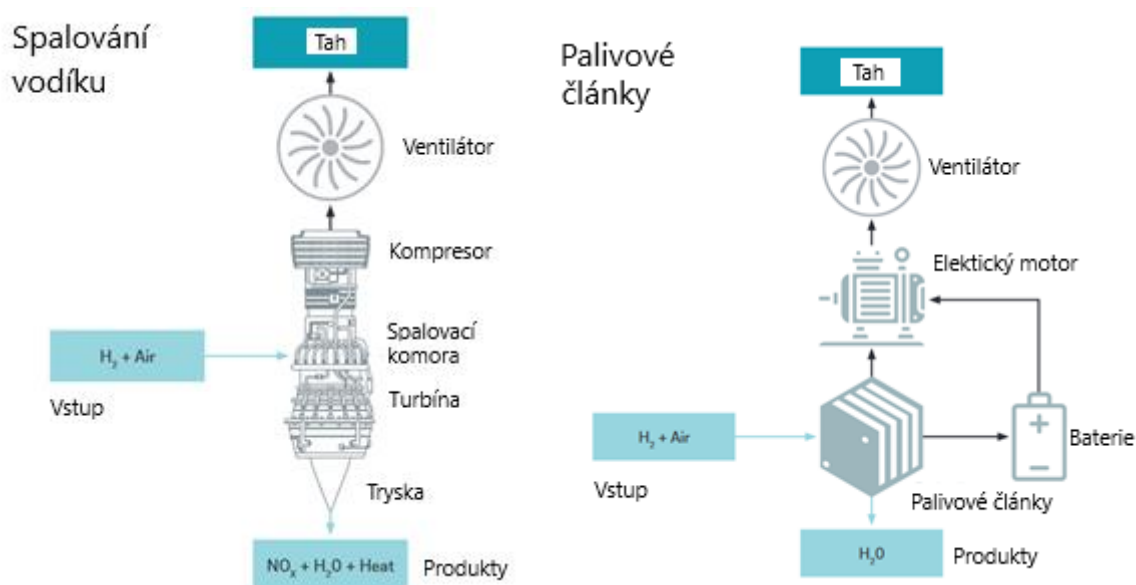
Ethanol (chemický vzorec C₂H₅OH) je druhý nejjednodušší alkohol, vznikající při alkoholovém kvašení jednoduchých cukrů působením kvasinek. Pro použití jako palivo je ethanol nejčastěji vyráběn z obilí, dalšími plodinami jsou kukuřice, brambory či cukrová třtina. První snahy o využití jako paliva začaly v 30. letech 20. století, ale větší pozornosti se mu dostalo až během ropné krize v 70. letech. Ethanol se začal využívat jako palivo pro pístové motory malých letounů. Maximální dolet letadla je s etanolem menší, než je tomu v případě leteckého benzínu. Také výkon motoru na ethanol je menší než s konvenčním palivem. Kvůli těmto nedostatkům je nepravděpodobné, že by ethanol mohl nahradit letecký benzín. Pro proudové motory se nenašlo využití, neboť jeho energetická hustota a měrná energie jsou příliš nízké a míchání s běžným petrolejem není možné kvůli rozdílným chemickým vlastnostem. [76, 77]

4.4.3 Nemísitelná paliva

Do této skupiny spadají paliva, která nejsou mísitelná s konvenčními palivy. Problémem je, že současný provoz ani používaná technika na jejich využívání nejsou připraveny a muselo by dojít k celkovému přesměrování leteckého provozu a vybudování zásobovací infrastruktury. Nejvíce zkoumaným palivem je vodík.

4.4.3.1 Vodík

Vodík (H_2) je považován v mnoha ohledech za dokonalé palivo budoucnosti. Účinné, netoxické, lze ho produkovat z obnovitelných zdrojů, nejedná se o skleníkový plyn a při použití v palivových článcích nevytváří žádné emise. Využití vodíku by také znamenalo snížení závislosti na dovozu ze zahraničních zemí a předpokládá se budoucí širší využití v průmyslu, dopravě a energetice. Problém je v současné produkci vodíku, asi 96 % spotřebovaného vodíku se vyrábí petrochemickými procesy a při výrobě se produkují oxidy uhlíku. Zbylé 4 % se vyrábí "čistě" elektrolyzou. Pomocí stejnosměrného proudu se rozkládá voda na kyslík a vodík. Nevýhodou je velké energetická spotřeba, přibližně $5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ vodíku při celkové účinnosti cca 18-28 %. Tato nízká účinnost je hlavní nevýhodou tohoto způsobu výroby vodíku. Pro vodík se zkoumají dvě metody využití v letectví, první obnáší spalování vodíku místo leteckého petroleje v upravené plynové turbíně, druhá metoda je výroba elektřiny z vodíku a kyslíku pro napájení elektromotorů.



Obr. 21 – Schéma spalovacího vodíkového motoru (vlevo), schéma motoru s vodíkovými články (vpravo) [73]

Spalování vodíku – Spalovací motor na vodík funguje na stejném principu jako proudový motor. V přední části vstupuje vzduch nasávaný kompresorem, který vzduch stlačuje a tím ohřívá. Vzduch dále putuje do spalovací komory, kde se vstříkuje palivo. Zažehnutím se směs vznítí a uvolněné plyny roztáčí turbínu. Za turbínou se tepelná energie mění na kinetickou a působí tah. Produkty při spalování vodíku jsou energie, vodní pára a oxidy dusíku. Oba plyny podporují skleníkový efekt. Vodní páry se vytváří více než v případě petroleje (asi 260 % více) a vytváří kondenzační stopy, které ve stratosféře zůstávají dlouhou dobu. Oxidy dusíku nejsou produkovány v takovém množství (cca o 90 % méně) a nejsou tak škodlivé jako oxidy uhlíku. Oproti konvenčnímu palivu nabízí vodík větší výkon na 1 kg, nevýhodou je jeho nízká hustota. Pro přepravu stejné hmotnosti letounu vyžaduje 4 až 5násobně větší objem než petrolej. Přechod na

vodíkový pohon vyžaduje vyřešení několika hlavních aspektů, přizpůsobení motorů pro spalování vodíku, dostatečná kapacita na dlouhé tratě, zajištění stálé dodávky paliva na letišti pomocí nové dopravní infrastruktury a přizpůsobení letišť pro větší kapacitu nového paliva. S tím vším jsou spojeny certifikační povolení, které v letectví znamenají velmi zdoluhavý proces. Oproti použití vodíkových článků jsou změny méně výrazné a bylo by jednodušší přizpůsobit zavedené postupy.

Vodíkové články – Při výrobě elektřiny chemickou reakcí kyslíku a vodíku vzniká jako vedlejší produkt pouze plynná vodní pára, přibližně 9 kg vodní páry na reakci 1 kg vodíku. Vliv takového množství vodní páry na globální klima je zatím nejasný a při vývoji se bere v potaz, jak omezit vypouštění vodní páry. Během roku 2019 bylo ohlášeno 5 vznikajících projektů využívajících vodíkové články. Většinou se jedná o velmi rané fáze výzkumu malých dopravních letadel (počet pasažérů do 20 sedadel). Jedinou výjimku tvoří projekt NASA CHEETA, který má za cíl vytvořit letoun pro komerční dopravu s konstrukcí samokřídla a elektrickým pohonem, poháněným kriogenicky chlazenými vodíkovými články. Projekt je financován 3 mil. dolarů na 3 roky. Studie tvrdí, že využití vodíkových článků (45-50 %) je efektivnější než spalování (40 %). To by znamenalo výrazně menší zásoby paliva v letounu. Využití technologie by vyžadovalo mnohem větší změny v konstrukci letadel a přepracování systémů na nový elektrický zdroj. [73, 75]

5. STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Z vytvořeného seznamu letadel a přiložených grafů lze vidět, jak se jednotlivé parametry pohybovaly v čase. Pro přesnější statistické porovnání by bylo potřeba seznam více rozšířit, nicméně i těchto omezených dat si lze udělat představu, jak se pohyboval vývoj letectví. V tab. č. 3 jsou průměrné hodnoty parametrů během dekád a v tab. č. 4 procentuální porovnání mezi desetiletími.

Léta	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Dolet [km]	MTOW [t]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita [ks]	MTOW/hmotnost
20.	6,801	25,774	1997,143	9,699	166,167	23,286	1,426
30.	4,296	33,797	885,000	9,200	196,333	32,333	2,142
40.	31,740	42,890	3966,667	40,840	501,667	91,000	1,287
50.	40,657	39,144	5143,429	78,175	741,833	112,000	1,923
60.	63,595	36,854	5080,175	132,454	1067,667	169,563	2,083
70.	83,384	43,189	4164,143	152,882	889,857	257,000	1,833
80.	53,781	37,197	4440,778	97,766	834,556	180,000	1,818
90.	89,238	46,989	7833,000	172,869	859,750	231,125	1,937

Tab. 3 – Průměrné hodnoty

Přelom	Hmotnost	Rozpětí	Dolet	MTOW	Rychlost	Kapacita
20./30.	63,2	131,1	44,3	94,9	118,2	138,9
30./40.	738,8	126,9	448,2	443,9	255,5	281,4
40./50.	128,1	91,3	129,7	191,4	147,9	123,1
50./60.	156,4	94,1	98,8	169,4	143,9	151,4
60./70.	131,1	117,2	82,0	115,4	83,3	151,6
70./80.	64,5	86,1	106,6	63,9	93,8	70,0
80./90.	165,9	126,3	176,4	176,8	103,0	128,4
20./90.	1312,2	182,3	392,2	1782,4	517,4	992,6
40./90.	281,2	109,6	197,5	423,3	171,4	254,0

Tab. 4 – Procentuální změny parametrů

Největšího růstu bylo dosaženo ve všech parametrech v 40. letech vlivem technologického vývoje během 2. světové války. Po 60. letech se vývoj ustálil, začalo období proudových motorů a rychlost růstu parametrů se začala snižovat až stagnovat.

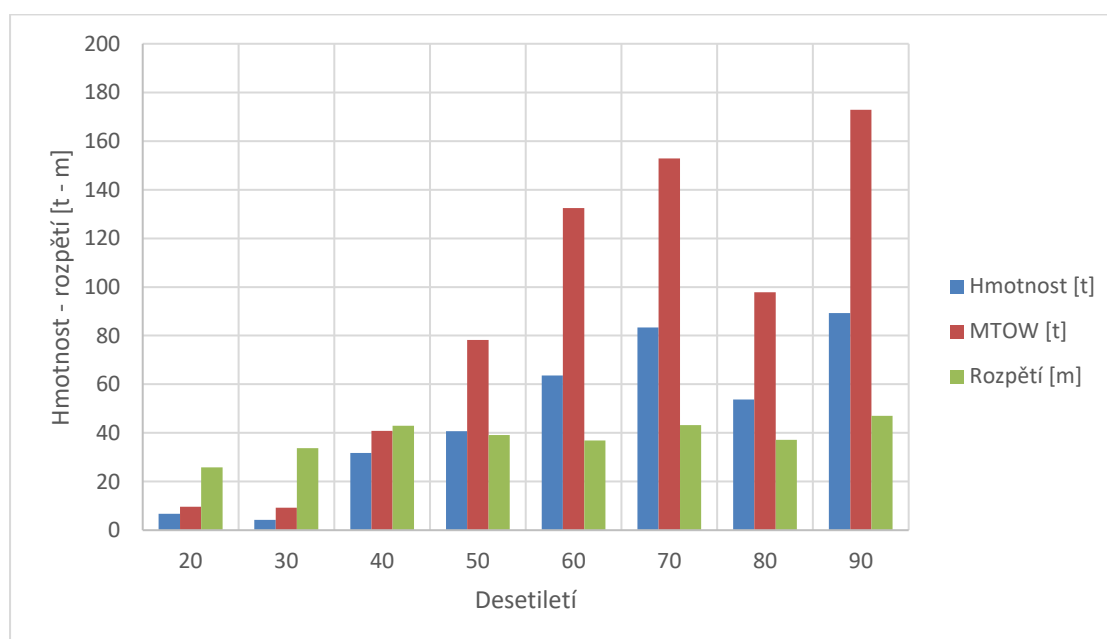
Nejlepším příkladem je vývoj cestovní rychlosti. Největší skok zaznamenala mezi 30. a 40. lety, kdy se zvětšila o 155 %. Hodnotově se během 50. let začala blížit rychlosti zvuku, která je pomyslnou hranicí pro ekonomicky výhodné cestování. Cestovní rychlost se od 20. až po 90. léta zvětšila o 417 % a mezi 40. a 90. lety o 71 %. Podobným vývojem si prošel i dolet, hmotnosti a kapacity pasažérů. Jediný parametr, který si neprošel bouřlivým rozvojem je rozpětí křídel, které se mezi 20. a 90. lety dočkalo růstu o pouhých 82 % (viz graf č. 12, 13).

Porovnáním procentuálních změn parametrů proudových letadel od 50. let 20. století (viz graf č. 12) se zjistí, že mezi 70. a 80 lety došlo k propadu všech parametrů. Tento propad časově odpovídá ropným šokům a přechodu na menší dvoumotorové letouny.

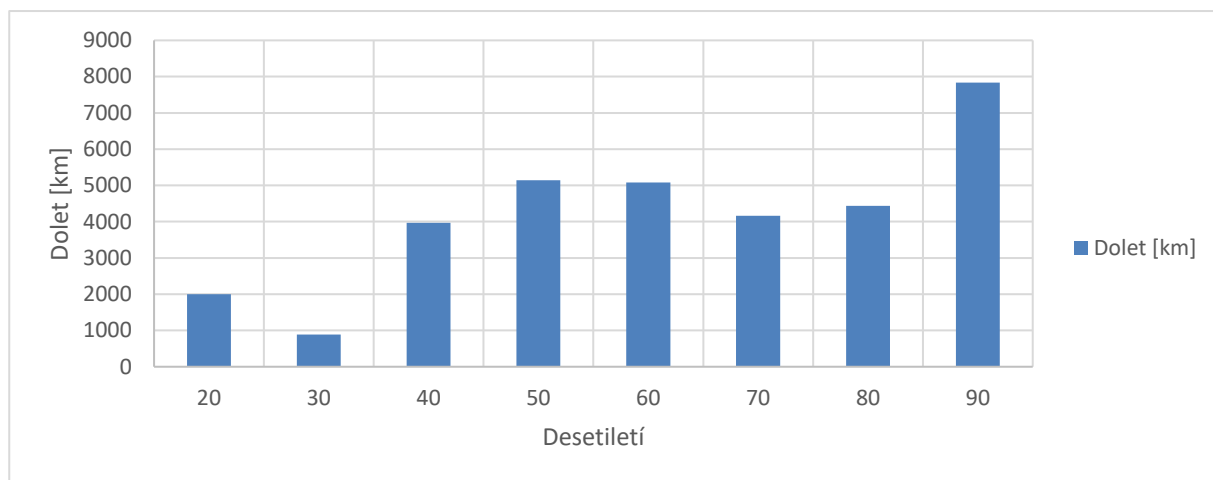
Letadlo	Dolet [km]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita [ks]	Redukce hluku[dB]	Spotřeba [%]
STARC-ABL	6480	238	150		
N3-X	13800	287	300	32-64 (oproti B737-800)	70 (oproti B737-800)
B777-200LR	13800	287	300		
SUGAR Volt	6480		150	34-31	60 (B737-800)
AURORA D8	5500	936	180	60	70 (B707)

Tab. 5 – Předpokládané parametry vyvíjených projektů

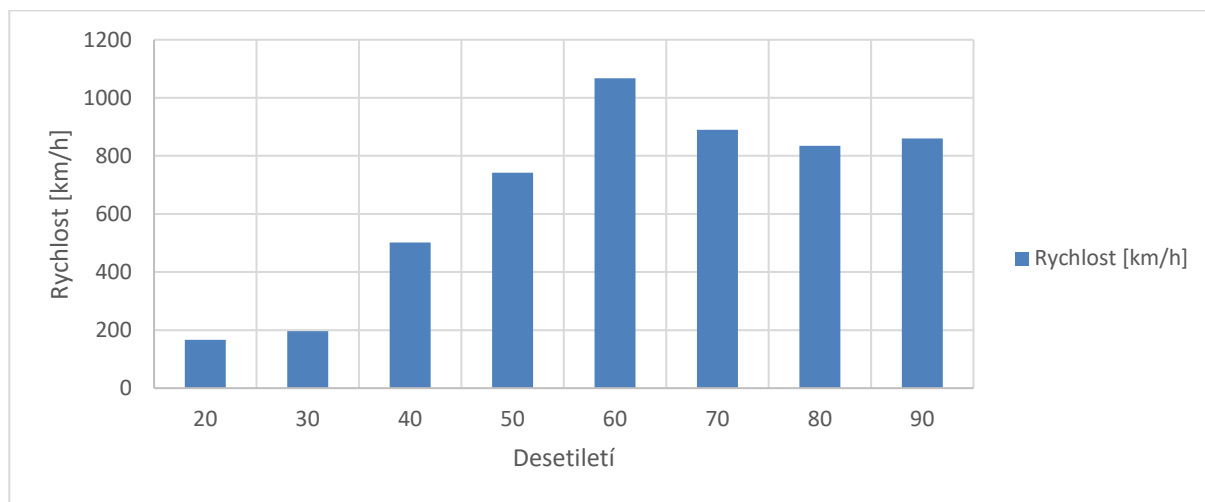
Do budoucna vyvíjené prototypy počítají s cestovní rychlostí přibližně 0,7-0,8 Machu. Tradičnější konstrukce trup – křídlo počítá s kapacitou 150-180 cestujících. Letadla využívající konstrukci samokřídla ovšem počítají s navýšením kapacit na 300 cestujících. S využitím různých typů elektrických pohonů se předpokládá snížení hlučnosti a spotřeby paliva.



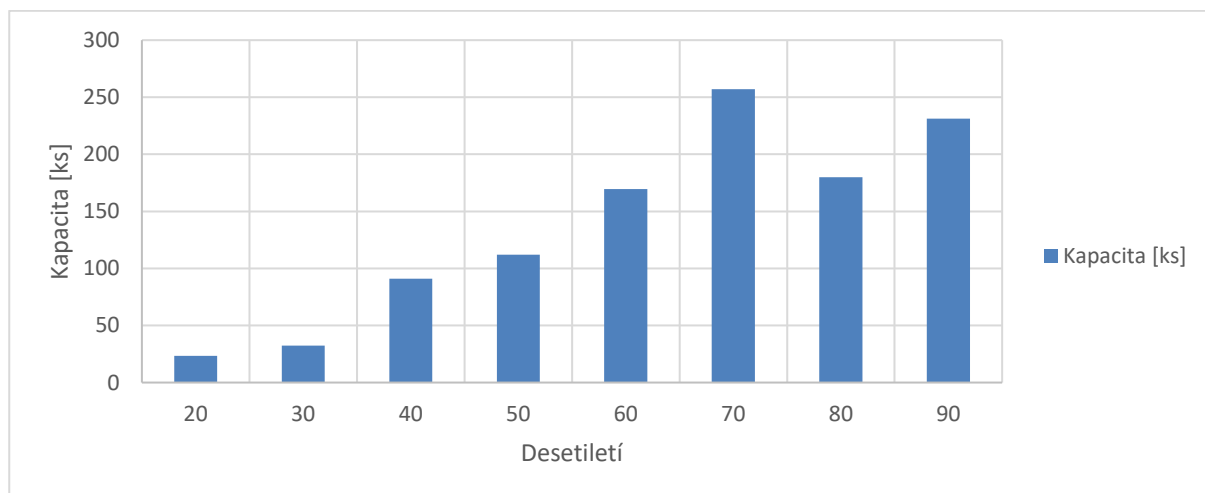
Graf. 8 – Vývoj hmotnosti, MTOW a rozpětí během 20. století



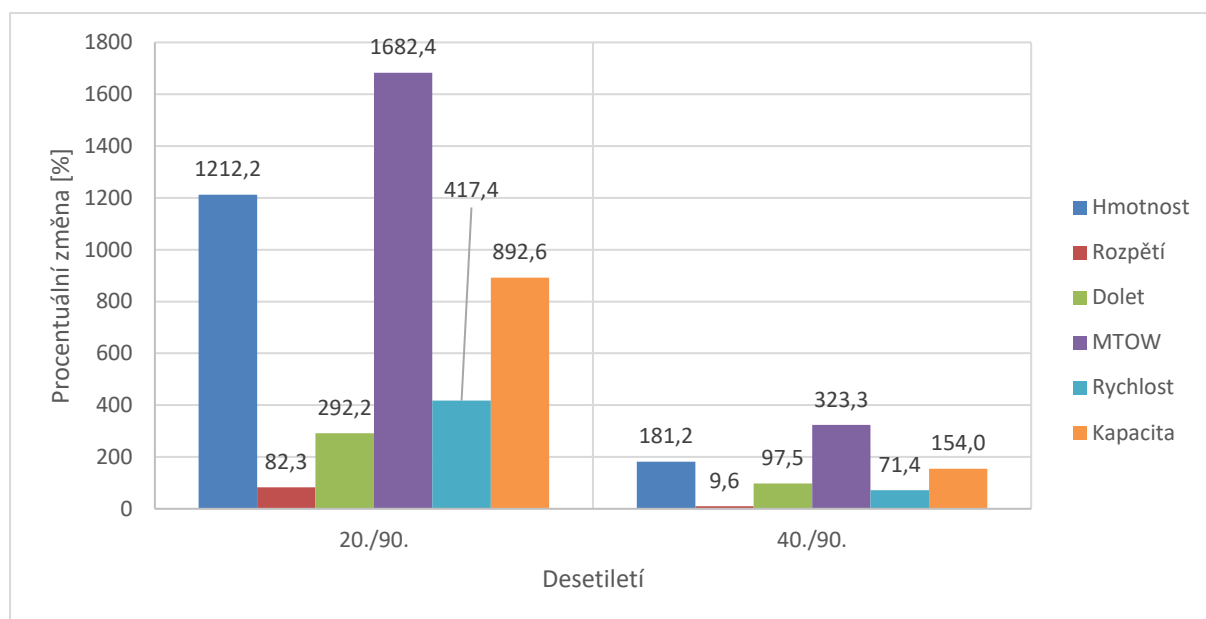
Graf. 9 – Vývoj doletu během 20. století



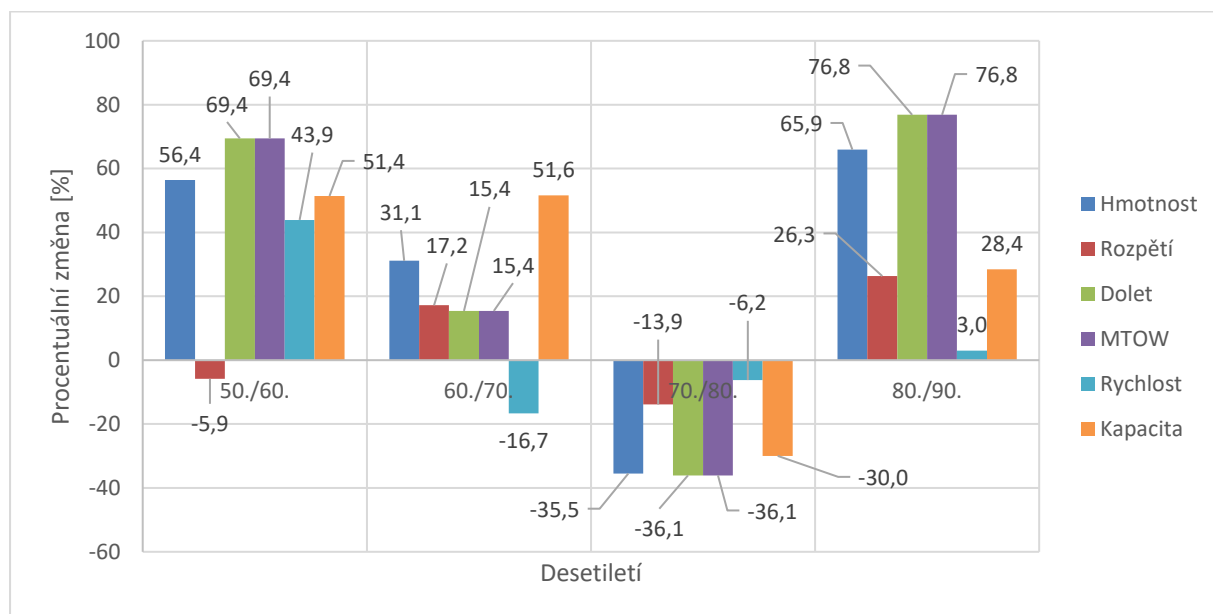
Graf. 10 – Vývoj cestovní rychlosti během 20. století



Graf. 11 – Vývoj kapacity během 20. století



Graf. 12 – Procentuální změny od 20. a 40. let 20. století



Graf. 13 – Procentuální změny od 50. let 20. století

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo shrnout aspekty ovlivňující vývoj letecké technologie a provozu. Práce je rozdělena na tři hlavní části. První část práce stručně shrnuje vybrané aspekty s příklady z minulého vývoje. Pro značnou obsáhlost historického vývoje nebylo možné zmínit všechny aspekty. Tento výběr nejpodstatnějších bodů slouží jako přehled, přičemž nejdůležitější vliv lze přisoudit technologickému pokroku dosaženého během 2. světové války, během které přešlo mnoho technologií do civilního letectví a provoz začal dbát mnohem více na bezpečnost a spolehlivost, čímž se letecká doprava otevřela široké veřejnosti. Létání, se zvyšující se nabídkou a snižující se cenou, tak přestalo být výsadou několika málo jedinců.

Druhá část práce se věnuje současnému důrazu na snižování dopadů na životní prostředí. Letecký provoz a jeho údržba na zemi významně dopadá nejen na lidské zdraví a místní okolí letišť, ale má také vliv na globální klima. Proto je snaha tyto dopady sledovat, analyzovat a snižovat. Jedná se zejména o produkovaní emisí pevných částic, plynných oxidů a hlučnosti.

Třetí část práce zkoumá budoucí plány leteckého průmyslu, kde je opět kladen důraz na ochranu životního prostředí. Základem všech plánů na udržitelný rozvoj leteckého průmyslu je zlepšovat efektivitu využívání paliva, neutrální růst uhlíkové produkce a zmírnit produkci uhlíkových plynů. Jedním z cílů IATA, který si stanovila roku 2009 bylo do roku 2020 ročně zvyšovat efektivitu využívání paliva o 1,5 % a snižovat produkce emisí na pasažéra o 2 %. Tyto cíle se daří plnit díky vývojovým technologiím. Dále jsou zde rozebrány vybrané zkoumané technologie a jejich výhody a nevýhody. Součástí práce je také vytvořený seznam letadel s grafy vývoje jednotlivých parametrů.

Do budoucna lze očekávat nástup nových generací letadel. Původně byl nástup odhadován na rok 2030 až 2040, nicméně současná pandemie COVID-19 bude mít výrazné dopady na letectví. Na více než rok výrazně omezila leteckou dopravu, řada provozovatelů pocítila značný úpadek, často i krach. Kvůli tomu je pravděpodobné, že řada vývojů se odloží nebo pozdrží, neboť vývoj technologií je nákladná záležitost. Výrobci budou méně riskovat a investovat do vývoje, čímž dojde k odsunu. Na druhou stranu pandemie urychlila odpis starších letadel, u kterých se dopravcům nevyplatilo provádět údržbu, když byly dlouhodobě neprovozovány a zakonzervovány. Tím pádem dojde k výměně starších modelů, které měly menší efektivitu, za nové.

Letecká doprava výrazně přispívá ke globalizaci a jako taková je velmi citlivá na veřejné mínění a celosvětové dění. Proto bylo důležité zajišťovat vysokou bezpečnost a spolehlivost. Těchto standardů se během let podařilo docílit, často i na úkor nehodám a lidským životům, a dnes je letectví nejbezpečnějším způsobem cestování. Se zvětšujícím se zájmem společnosti o ochranu životního prostředí, roste i tlak na leteckou dopravu. Vzniká řada technologií a nových konstrukcí, které mají za cíl snižovat dopady na životní prostředí. Ze zmiňovaných technologií

má největší potenciál přechod na alternativní palivo vodík spolu s využitím nových konstrukcí, ale stále s tradiční stavbou trup – křídlo.

Letectví vlivem mnoha předpisů a opatření velmi pomalu zavádí změny, ať už se jedná o konstrukci letadel, postupy či pozemní techniku. Proto by bylo vhodnější začít s konstrukčními změnami, které významně neovlivní postupy a bezpečnost během letu. Přechod na spalovací motory, které využívají k pohonu vodík, lze přirovnat k přechodu z pístových motorů na turbovrtulové v 50. letech. Princip a konstrukce je podobná a neměla by takový dopad na bezpečnost jako přechod na palivové články, s kterými nejsou žádné zkušenosti z provozu. Největším problémem by tak bylo zařídit infrastrukturu a pravidelnou dodávku paliva. Podobnosti v procesu doplňování paliva mezi vodíkem a petrolejem by mohly usnadnit přechod mezi novým a starým procesem, vodík by ovšem vyžadoval různá potrubí, skladování a potenciálně odlišné teploty kapaliny.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Evolution of international aviation: phoenix rising*. II., rozšířené vydání. Aldershot: Ashgate, 2003. ISBN 07-546-3785-9.
- [2] NĚMEČEK, Václav. *Civilní letadla: phoenix rising*. II., rozšířené vydání. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1981. Knižnice letecké dopravy. ISBN 07-546-3785-9.
- [3] PRUŠA, Jiří. *Svět letecké dopravy*. Praha: Galileo CEE Service ČR, 2007. ISBN 978-80-239-9206-9.
- [4] PRUŠA, Jiří, Martin BRANDÝSKÝ, Luboš HLINOVSKÝ, Jiří HORNÍK, Michal PAZOUREK, František SLABÝ, Marek TŘEŠŇÁK a Jiří ŽEŽULA. *Svět letecké dopravy*. II., rozšířené vydání. Praha: Galileo Training, 2015. ISBN 978-80-260-8309-2.
- [5] Řízení letového provozu ČR. [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.rlp.cz/spolecnost/profil/Stranky/historie.aspx>
- [6] Simple flying. [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://simpleflying.com/what-are-etops-rules/>
- [7] *Letecká doprava v ČR* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/wg8v3/text_finalni.txt?studium=282101;vysl=19055
- [8] *History of Aviation-A Short Review* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [://www.researchgate.net/publication/317056911_History_of_Aviation-A_Short_Review](http://www.researchgate.net/publication/317056911_History_of_Aviation-A_Short_Review)
- [9] *Fuel efficiency of commercial aircraft* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2005-12_nlr_aviation_fuel_efficiency.pdf
- [10] *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf
- [11] *Historical Crude Oil Prices* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://inflationdata.com/articles/inflation-adjusted-prices/historical-crude-oil-prices-table>
- [12] *Vývoj osobní letecké dopravy v závislosti na ekonomických ukazatelích s dopadem na cestující* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.grantjournal.com/issue/0101/PDF/0101skolilova.pdf>
- [13] Cena ropy v roce 2021. <https://www.lynxbroker.cz/vzdelavani/cena-ropy/> [online]. [cit. 2021-5-13].

- [14] LCC capacity in Europe set for half a billion seats in 2018. <https://www.anna.aero/2018/07/18/lcc-capacity-in-europe-set-for-half-a-billion-seats-in-2018/> [online]. [cit. 2021-5-13].
- [15] *Analýza vývoje ceny leteckého paliva* [online]. Praha, 2014 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64084/F6-DP-2014-Kusova-Beata-Analyza_cen_leteckeho_paliva.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT.
- [16] *NÍZKONÁKLADOVÉ LETECKÉ SPOLEČNOSTI NA ČESKÉM TRHU* [online]. Olomouc, 2016 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://theses.cz/id/qd60ve/Aneta_Muchov_-_Bakal_s_k_prce.pdf. Bakalářská práce. Univerzita Palackého Olomouc.
- [17] *Socio-economic and demographic factors that contribute to the growth of the civil aviation industry, Procedia Manufacturing, Volume 19* [online]. 2018, , 9 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300027>
- [18] *Worries about new composite made airplane* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>
- [19] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [20] *A Survey of Aircraft Materials: Design for Airworthiness and Sustainability* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/311750391_A_Survey_of_Aircraft_Materials_Design_for_Airworthiness_and_Sustainability
- [21] *Vývoj používání materiálů pro letadlové konstrukce* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/17306437.pdf>. Bakalářská práce. VŠB.
- [22] MOIR, Ian a A. G. SEABRIDGE. *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*. Reston: AIAA American Institute of Aeronautics, 2001. ISBN 15-634-7506-5.
- [23] *THE EVOLUTION OF FLIGHT CONTROL SYSTEMS* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/286926246_THE_EVOLUTION_OF_FLIGHT_CONTROL_SYSTEMS_TECHNOLOGY_DEVELOPMENT_SYSTEM_ARCHITECTURE_AND_OPERATION
- [24] *MOTIVACE K TERORISMU A VÝCHODISKA BOJE S NÍM* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.mocr.army.cz/mo/obrana_a_strategie/1-2005cz/parizkova.PDF

- [25] *Únos Boeingu 727 v roce 1971* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://cs.istanbulbear.org/den-kuper-d-b-kuper-ugon-samol-ta-boeing-v-godu-5724>
- [26] Fatal Accidents Per Year 1946-2019. *Aviation Safety Network* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://aviation-safety.net/statistics/>
- [27] Accident Overview Air Transat 236. *Federal Aviation Administration* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=2&LLID=73&LLTypeID=2
- [28] Air Transat 236. *Aviation Chief* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.aviationchief.com/air-transat-236.html>
- [29] METODICKÁ SMĚRNICE PRO PŘÍPRAVU A ORGANIZACI ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD A INCIDENTŮ V CIVILNÍM LETECTVÍ. *ÚSTAV PRO ODBORNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [https://uzpln.cz/upload/Pov%C4%9B%C5%99en%C3%AD/P%C5%99edpisy/METODICK%C3%81%20SM%C4%9ARNICE%20LN%20BRO%C5%BDURA%20%5B3.0%5D\(1\).pdf](https://uzpln.cz/upload/Pov%C4%9B%C5%99en%C3%AD/P%C5%99edpisy/METODICK%C3%81%20SM%C4%9ARNICE%20LN%20BRO%C5%BDURA%20%5B3.0%5D(1).pdf)
- [30] Přírodní katastrofy. *Svět geologie* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/svet-geologie/poznej-geologii/geologicka-temata/prirodni-katastrofy>
- [30] SOUKOP, R. Vliv vulkanického popela na leteckou dopravu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 108s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Chlebek, Ph.D..
- [31] Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic. *EUROCONTROL* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/article/attachments/201004-ash-impact-on-traffic.pdf>
- [32] Předpis L16; Ochrana životního prostředí. *Řízení letového provozu* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [33] Annex 1 to 18; The Convention on International Civil Aviation. *Skybrary* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/3370.pdf>
- [34] *Hluková problematika přiletových tratí* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77338/F6-DP-2018-Kotvaldova-Tereza-Hlukova%20problematika%20priletovych%20trati.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT.
- [35] *Aerodynamic Noise Reduction Using Active Flow Control Techniques* [online]. , 7 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z:

- https://www.researchgate.net/publication/309310979_Aerodynamic_Noise_Reduction_Using_Active_Flow_Control_Techniques
- [36] NASA chce snížit spotřebu, emise a hluk letadel civilního letectví. *Aeroweb* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/4577-nasa-chce-snit-spotrebu-emise-a-hluk-letadel-civilniho-letectvi>
- [37] *Aircraft Noise Reduction Technology and Airport Noise Analysis for General Aviation Revitalization* [online]. , 16 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281869714_Aircraft_Noise_Reduction_Technology_and_Airport_Noise_Analysis_for_General_Aviation_Revitalization
- [38] Noise Control. *Purdue* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/basics/noise.html>
- [39] CO2 EMISSIONS FROM COMMERCIAL AVIATION. *ICCT* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/CO2-commercial-aviation-oct2020.pdf>
- [40] Aviation and the Global Atmosphere. *Grida* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.grida.no/climate/ipcc/aviation/index.htm>
- [41] Can WheelTug, A Driveable Aircraft Nosewheel, Save Airlines Money? *Forbes* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/michaelgoldstein/2020/09/11/can-wheeltug-a-driveable-aircraft-nosewheel-save-airlines-money/?sh=1a9edc10eb4b>
- [42] Analysis of Aircraft Fuel Burn and Emissions in the Landing and Take Off Cycle using Operational Data. *ICRAT* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.icrat.org/icrat/seminarContent/Author/Yashovardhan%20SushilChati842/641-cfp-Chati.pdf>
- [43] Four-dimensional trajectory data: a pathway to decarbonisation. *SESAR* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.sesarju.eu/news/four-dimensional-trajectory-data-pathway-decarbonisation>
- [44] Continuous descent operations. *SESAR* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/solution/Sol11%2001%20CN%20Solution%2011%20Continuous%20Descent%20Operations%20\(CDO\).pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/solution/Sol11%2001%20CN%20Solution%2011%20Continuous%20Descent%20Operations%20(CDO).pdf)
- [45] Aircraft Technology Roadmap to 2050. *IATA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>
- [46] Aircraft Aerodynamic Boundary Layers. *Sciencedirect* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/riblets>

- [47] The most efficient winglet on any airplane. *Boeing* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.boeing.com/commercial/737max/737-max-winglets/>
- [48] DANĚK, Milan. *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty a techniky*. Praha: Naše vojsko, 1958. Knihnice letectví (Naše vojsko).
- [49] Advance and UltraFan. *Rolls-Royce* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/innovation/2016/advance-and-ultrafan.aspx#solution>
- [50] *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.safran-aircraft-engines.com/innovation-0>
- [51] SAFRAN AND AVIATION'S ELECTRIC FUTURE. *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.safran-group.com/sites/group/files/dp_safran_bourget_2019_safran_and_aviations_electric_future_en.pdf
- [52] Horten Ho 229. *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Horten_Ho_229
- [53] How sweet the future of aviation. *Boenig* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/aug2017/feature-technical-sugar.page>
- [54] BOX WING FUNDAMENTALS – AN AIRCRAFT DESIGN PERSPECTIVE. *HAW* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PUB_DLRK_11-09-27.pdf
- [55] Cost-Driven Design of a Large Scale X-Plane. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312041238_Cost-Driven_Design_of_a_Large_Scale_X-Plane
- [56] Shape Memory Alloy in Various Aviation Field. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273499103_Shape_Memory_Alloy_in_Various_Aviation_Field
- [57] SMA Actuators for Morphing Wings. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273499103_Shape_Memory_Alloy_in_Various_Aviation_Field
- [58] Open Rotor. *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.safran-group.com/node/16322?button=1&index=0>
- [59] Open Rotor. *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.safran-group.com/media/what-does-future-hold-store-open-rotor-20190328>

- [60] *Centrelines* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.centrelines.eu/wp-content/uploads/2019_CENTRELINE_Policy_Makers_Workshop_Brussels.pdf
- [61] CONCEPT VALIDATION STUDY FOR FUSELAGE WAKE-FILLING PROPULSION INTEGRATION. *ICAS* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0342_paper.pdf
- [62] NASA Electric Propulsion System Studies. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160009274/downloads/20160009274.pdf>
- [63] B-2-Spirit. *Northropgrumman* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.northropgrumman.com/wp-content/uploads/B-2-Spirit-of-Innovation.pdf>
- [64] Airbus reveals its blended wing aircraft demonstrator. *Airbus* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/02/airbus-reveals-its-blended-wing-aircraft-demonstrator.html>
- [65] MAVERIC. *Aero-mag* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aero-mag.com/airbus-reveals-its-blended-wing-aircraft-demonstrator/>
- [66] Airbus and Rolls-Royce cancel E-Fan X hybrid-electric RJ100 experiment. *FlightGlobal* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.flightglobal.com/air-transport/airbus-and-rolls-royce-cancel-e-fan-x-hybrid-electric-rj100-experiment/138067.article>
- [67] Aviation Renaissance: NASA Advances Concepts for Next-gen Aircraft. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/aviation-renaissance-nasa-advances-concepts-for-next-gen-aircraft>
- [68] Single-aisle Turboelectric Aircraft with Aft Boundary-Layer Propulsion. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/starc-abl/>
- [69] Wright Electric Begins 1.5 mW Engine Development Program for 186-Seat Commercial Airliner. *AviationToday* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aviationtoday.com/2020/01/30/wright-electric-begins-1-5-mw-engine-development-program-186-seat-commercial-airliner/>
- [70] EasyJet ‘electric aircraft’ partner aims to fly engine in 2023. *FlightGlobal* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.flightglobal.com/programmes/easyjet-electric-aircraft-partner-aims-to-fly-engine-in-2023/136456.article>
- [71] Beauty of Future Airplanes is More than Skin Deep. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/future_airplanes.html

- [72] NASA N3-X. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150002081/downloads/20150002081.pdf>
- [73] *FOCUS* [online]. , 28 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK EwiO1tz23rnuAhUk_SoKHQayDV0QFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.rolandberger.com%2Fpublications%2Fpublication_pdf%2Froland_berger_hydrogen_the_future_fuel_for_aviation.pdf&usg=AOvVaw3FdeDN1OyuSx0UzTxR4x6m
- [74] AVIATION FUEL EVOLUTION: A REVIEW. *ASECU* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: http://www.asecu.gr/files/13th_conf_files/The-Aviation-Fuel-Evolution-A-Review.pdf
- [75] Liquid hydrogen as a potential low-carbon fuel for aviation. *IATA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact_sheet7-hydrogen-fact-sheet_072020.pdf
- [76] A review on alternative fuels in future energy system. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/341681937_A_review_on_alternative_fuels_in_future_energy_system
- [77] Review of Alternative Fuel Initiatives for Leaded Aviation Gasoline (AVGAS) Replacement. *AIDIC* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aidic.it/cet/18/63/030.pdf>
- [78] How Many DC-3 Are Still Flying? *SimpleFlying* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://simpleflying.com/dc-3-operation/>
- [79] Point-to-Point versus Hub-and-Spoke Networks. *TransportGeography* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://transportgeography.org/contents/chapter2/geography-of-transportation-networks/point-to-point-versus-hub-and-spoke-network/>
- [80] Outside the Box, Sort of. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/outside-the-box-sort-of>
- [81] Flightpath 2050. *European Commission* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/doc/flightpath2050.pdf>
- [82] ZUBRVALČÍK, Jan. *Historie civilního letectví 1970-2000* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117360>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.

- [82] *Ochrana životního prostředí* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/el/law/podzim2017/MVV230K/um/Zivotni_prostredi_v_pravu_civilniho_letectvi.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
APU	Auxiliary Power Unit – Pomocná motorová jednotka
ATC	Air Traffic Control – Řízení letového provozu
ATM	Air Traffic Managment
CDA	Continuous Descent Arrival – Metoda plynulého klesání
ČSL	Česká správa letišť
E-AMAN	Extended Arrival MANagment horizon
EASA	European Union Aviation Safety Agency – Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví
Ekmp	Měrná energie
Ekmp	Energetický obsah paliva
EPA	Enviromental Protection Agency – Agentura pro ochranu životního prostředí
ERP	Emergency Response Plan
ETOPS	Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards
EU	Evropská unie
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation – Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu
FAA	Federal Aviation Administration
HDP	Hrubý domácí produkt
IATA	International Air Transport Association – Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAN	International Commission for Air Navigation – Mezinárodní komise pro leteckou navigaci
ICAO	International Civil Aviation Organisation – Mezinárodní organizaci pro civilní letectví
IEA	International Energy Agency – Mezinárodní agentura pro energii
IVATF	International Volcanic Ash Task Force – Mezinárodní úkolová jednotka pro vulkanický popel
K	Kapacita pasažérů
LCC	Low-Cost Carries – Nízkonákladový dopravci

MIT	Massachusetts Institute of Technology
MLW	Maximum Landing Weight – Maximální přistávací hmotnost
MTOW	Maximum Take Off Weight – Maximální vzletová hmotnost
MZFW	Maximum Zero Fuel Weight – Maximální hmotnost bez paliva
NASA	National Aeronautics and Space Administration – Národní úřad pro letectví a vesmír
NM	Nautical Mile – Námořní míle
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci v Evropě
OEW	Operating Empty Weight – Operační hmotnost letadla
OPEC	Organisation of the Petroleum Exporting Countries – Organizace zemí vyvážejících ropu
OSN	Organizace spojených národů
S	Dolet
SAW	Spanwise Adaptive Wing
SESAR	Single European Sky ATM Research
SMA	Shape Memory Alloy
SUGAR	Subsonic Ultra Green Aircraft Research
TMA	Terminal Control Area – Koncová řízená oblast
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
USA	Spojené státy americké
UTC	Coordinated Universal Time – Koordinovaný světový čas
ÚZPLN	Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod

PŘÍLOHA

Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [t]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Max. rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
Douglas Cloudster	1921	4,354	17,04	11,2	3,66	890	300	100	-	137	190	1
Caproni Ca.60	1921	14	30	23,45	9,15	610	294	-	26000	130	-	108
Lioré et Olivier LeO 21	1926	3,44	23,03	15,55	4,5	560	336	-	5700	-	190	15
Junkers G 31	1926	5,25	30,5	16,5	6	850	386	-	-	170	210	19
Spirit of St. Louis	1927	0,975	14	8,4	3	6600	166	-	2330	177	214	1
Sikorsky S-38	1928	2,727	21,85	12,27	4,22	970	298	108	4764	175	200	12
Junkers G 38	1929	16,86	44	23,2	7,2	3500	309	-	-	208	245	7
Junkers Ju 52	1930	6,51	29,25	18,9	4,5	870	533	-	9200	211	265	21
Supermarine S.6B	1931	2,082	9,14	8,79	3,73	-	1750	-	-	153	655,8	1
Tupolev ANT-20	1934	-	63	35,45	10,25	900	882	-	-	225	275	75
Me 323	1942	27,33	55,2	28,2	10,15	800	868	-	10150	218	285	130
Lockheed Constellation	1943	36,15	38,47	35,42	7,54	8700	2424		62370	547	607	95
Lockheed L-1649 Starliner	1957	47,57	46	35,41	7,54	7950	2500		70800	470	607	99
Douglas DC-7	1953	33	42	37	10,5	7410	2535		65000	570	653	105
Boeing 707	1957	57,6	39,88	44,22	12,7	6667	-	80	117000	977	-	177
Vickers VC10	1962	63,278	44,552	48,362	12,04	10841	-	93,41	-	875	933	140
BAC 111	1963	21,007	26,97	28,5	7,47	1340	-	46,3	35600	-	882	91
Il-62	1963	71,6	43,2	63,12	12,35	10000	-	107,9	165000	-	900	186
DC-9	1965	22,3	27,25	31,82	8,4	2400	-	62	41141	-	897	92

Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [t]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Max. rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
An-22	1965	114	64,4	57,9	12,53	5000	11186	-	250000	-	740	296
Tu-144D	1968	99,2	28,8	65,7	12,5	5330	-	196,1	207000	2120	2285	123
Concorde	1969	78,7	25,6	61,66	12,2	7222,8	-	169	185070	2158	2179	123
Boeing 747	1969	162,4	59,6	70,6	19,3	9800	-	223	333390	893	955	455
DC-10	1970	108,94	47,35	55,55	17,53	6482	-	177,92	195045	876	-	273
Lockheed L-1011 TriStar	1970	110	47,35	54,17	16,87	4963	-	187	200000	963	-	259
A300	1972	88,505	44,84	53,61	16,72	5375	-	230	165000	956	-	348

Tab. 1 – Seznam letadel od 20. let po 70. léta 20. století

Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Motory	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [kg]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
CRJ-100	1992	13,65	21,2	26,8	6,2	1815	2		38,83	21520	851	50
CRJ-200		13,83	21,2	26,8	6,2	3713	2		41	13130	851	50
B717	1999	30,9	28,46	37,81	8,92	3815	2		93	54885	810	115
Bae-146-100	1981	23,72	26,21	26,2	8,61	2870	4		30	38102	800	82
Bae-146-200		24,49	26,21	28,6	8,59	2685	4		31	42184	800	85
Bae-146-300		25,36	26,21	30,99	8,59	2509	4		31	44225	800	116
1-11 200	1965	21,41	26,97	28,5	7,47	1410	2		47,1	35833	742	69
1-11 300		22,1	26,97	28,5	7,47	2300	2		50,67	39462	742	89
1-11 400		22,49	26,97	28,5	7,47	2300	2		51	40143	742	89
1-11 500		24,76	28,5	32,61	7,47	2744	2		55,8	47400	742	119
Mercure	1974	28,9	30,55	34	11,37	750	2		68,89	56500	825	162
F.28-1000	1969	15,65	23,58	27,4	.	1850	2		43,78	28580	670	65
F.28-2000		16,51	23,58	29,61	.	1362	2		43,45	29480	670	79
F.28-4000		17,12	25,07	29,61	8,47	1903	2		44	32300	680	85
F.28-6000		15,64	25,07	29,61	8,47	1667	2		44	33100	678	85
F70	1988	22,67	28,08	30,91	8,51	1690	2		85	41730	800	80
F100		23,25	28,08	35,31	8,5	2956	2		122	41500	861	107
Trident 1C	1964	30,32	27,38	34,97	.	2388	3		43,8	52163	932	101
Trident 1E		32,46	28,96	34,97	.	3554	3		50,7	60780	932	140
Trident 2E		33,2	29,87	34,97	.	3910	3		53,02	65090	959	149
Trident 3B		37,86	29,87	39,98	.	1761	3		53,02	68040	858	152
DC-9-10	1965	20,56	27,25	31,82	8,38	1755	2		53,34	37650	895	90
DC-9-20		22,62	28,47	31,82	8,38	2110	2		64,5	44450	903	90
DC-9-30		24,01	28,47	36,37	8,38	2148	2		64,5	44450	909	115
DC-9-40		25,26	28,47	38,28	8,38	1918	2		71,12	51710	903	125

Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Motory	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [kg]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
DC-9-50		28,07	28,47	40,72	8,38	1500	2		71,12	54885	898	139
DC-9-80		35,29	32,87	45,06	8,38	3306	2		82,3	63502	878	172
Tu-134A	1967	29	29,01	37,32	9,02	2200	2		66,69	47000	850	72
Tu-134B		29	29,01	37,32	9,02	1950	2		67,96	47600	890	80

Tab. 2 – Seznam letadel od 60. let na krátké tratě [82]

Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Motory	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [kg]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
A300B2	1974	85,41	44,84	53,62	16,53	3430	2		236	140000	847	230
A300B4		88,5	44,84	53,62	16,53	5375	2		236	165000	847	230
A300-600		90,9	44,84	54,1	16,5	7505	2		276	172000	876	266
A310-200	1983	79,45	43,9	46,64	15,8	4000	2		236,65	142000	850	218
A310-300		83,1	43,9	46,64	15,8	5600	2		240	164000	850	218
A319		40,1	35,8	33,84	11,76	4907	2		120	76000	828	140
A320	1987	41,5	35,8	37,57	11,76	5460	2		120	78000	828	165
A321		48,5	35,8	44,51	11,76	4350	2		147	94000	828	206
B707-120	1958	53,25	39,87	44,04	12,94	5177	4		55,62	116575	884	179
B707-320		61,24	43,41	46,61	12,93	7450	4		70,29	141520	876	189
B727-100	1964	40,37	32,92	40,59	10,36	3260	2		62,3	76655	917	131
B727-200		45,09	32,92	46,69	10,36	2685	2		71,1	86820	917	163
B727 Adv. 200		46,02	32,92	46,69	10,36	4635	2		77,3	95027	917	145
B737-100	1967	28,12	28,35	28,65	11,23	2946	2		64,4	44225	780	113
B737-200		29,6	28,35	30,53	11,23	4900	2		71,2	52390	780	136
B737-300		32,9	28,88	33,4	11,13	4800	2		88,9	56472	795	149
B737-400		35,1	28,8	36,45	11,13	4635	2		104,5	62822	795	188
B737-500		31,9	28,8	31,01	11,13	5555	2		82,3	57810	795	140
B737-600		36,44	28,8	31,01	11,13	5555	2		82,3	49885	850	140
B737-700		27,59	34,32	33,6	12,6	6113	2		89	70068	850	149
B737-800		41,48	34,32	39,5	12,6	5422	2		107	79002	850	189
B737-900		44,68	34,2	41,2	12,6	5050	2		117,3	79002	850	189
B757-200	1983	57,84	38,05	47,32	13,56	7600	2		193,5	115680	850	239
B757-300		57,84	38,08	54,47	13,56	6658	2		193,5	123600	850	295
IL-18A	1959	30,58	37,42	35,9	10,17	3300	4	2982		59350	650	89

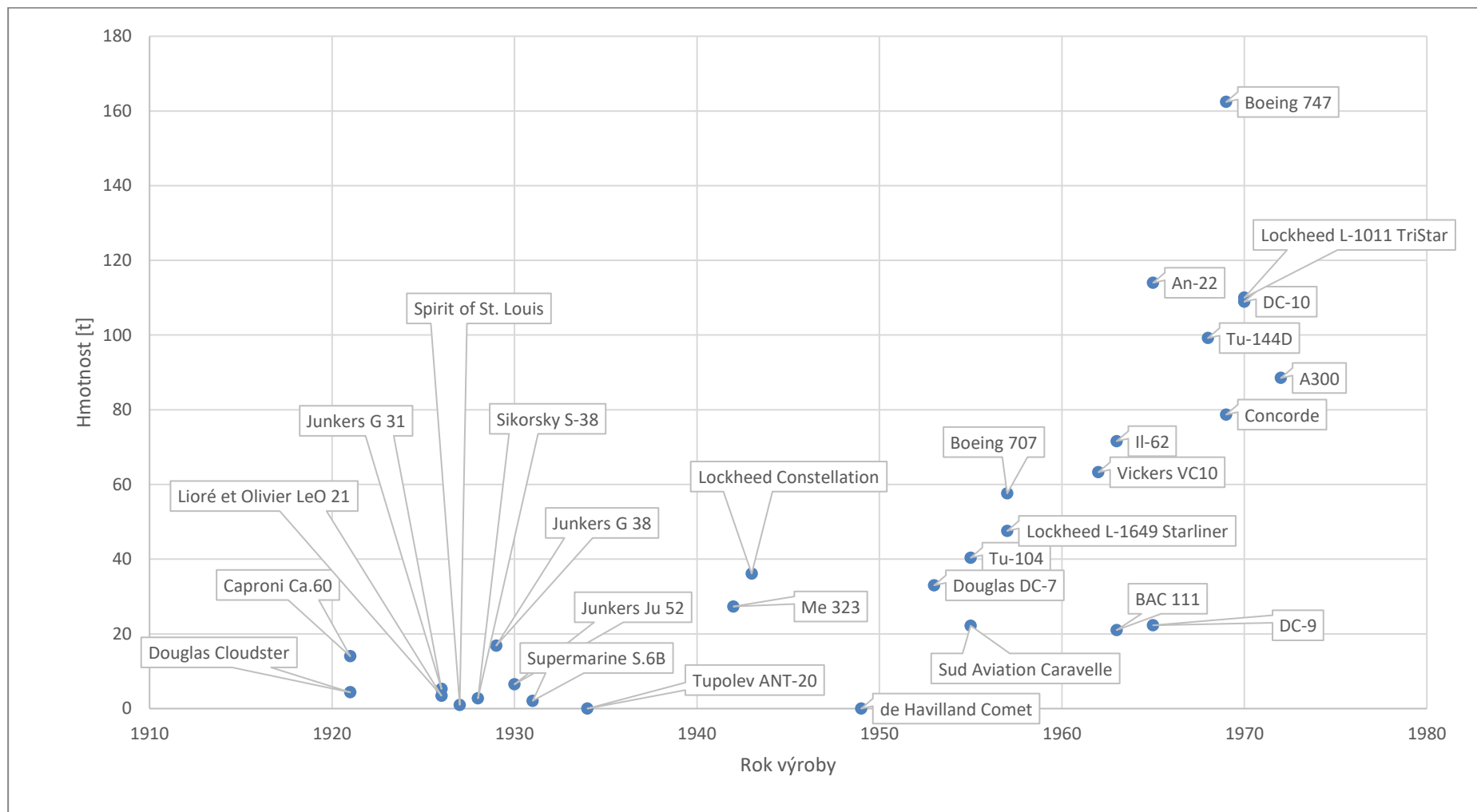
Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Motory	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [kg]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
Il-18B		.	37,42	35,9	10,17	3300	4	2982		61200	.	89
Il-18V		34,63	37,4	35,9	10,17	3200	4	3075		61200	600	110
Il-18D		35	37,4	35,9	10,17	3700	4	3124		64000	625	65
Il-18E		34,63	37,4	35,9	10,17	3200	4	3124		61400	625	122
Il-86	1980	116,25	48,06	59,54	15,81	4600	4		127,5	206000	900	350
Jak-42	1981	28,96	34,2	36,38	9,83	1450	3		63,2	52000	820	120
Jak-42D		34,52	34,88	36,38	9,83	1700	3		103,8	57000	700	120
MD-81	1980	33,33	32,87	45,06	9	2897	2		82,3	63505	813	142
MD-82		37,9	32,87	45,1	9	3800	2		92,9	67800	810	144
MD-83		38,74	32,87	39,7	9	4600	2		93,4	75580	810	144
MD-87		35,31	32,87	45,1	9,3	4395	2		88,98	63503	810	144
MD-88		38,74	32,87	45,1	9	4850	2		93,4	75580	810	144
MD-90	1993	40,01	32,87	46,51	9,33	4200	2		111,21	70760	809	153
Tu-154	1972	43,5	37,55	47,9	11,4	3850	3		93,2	84000	900	167
Tu-154A		44,1	37,55	47,9	11,4	4000	3		100	94000	910	152
Tu-154B		50,76	37,55	47,9	11,4	4000	3		103	96000	915	152
Tu-154M		53	37,5	48	11,4	5600	3		103,95	100000	880	180
Tu-204	1995	56,92	41,8	46,1	13,88	3900	2		157,28	94600	830	214
Tu-204-100		58,8	41,8	46,1	13,88	5000	2		157,28	103000	850	210
Tu-204-120		.	41,8	46,1	13,88	5000	2		189,37	103000	850	210
Tu-204-300		57,5	41,8	40,2	13,88	7200	2		157,28	103000	850	162

Tab. 3 – Seznam letadel od 60. let na střední tratě [82]

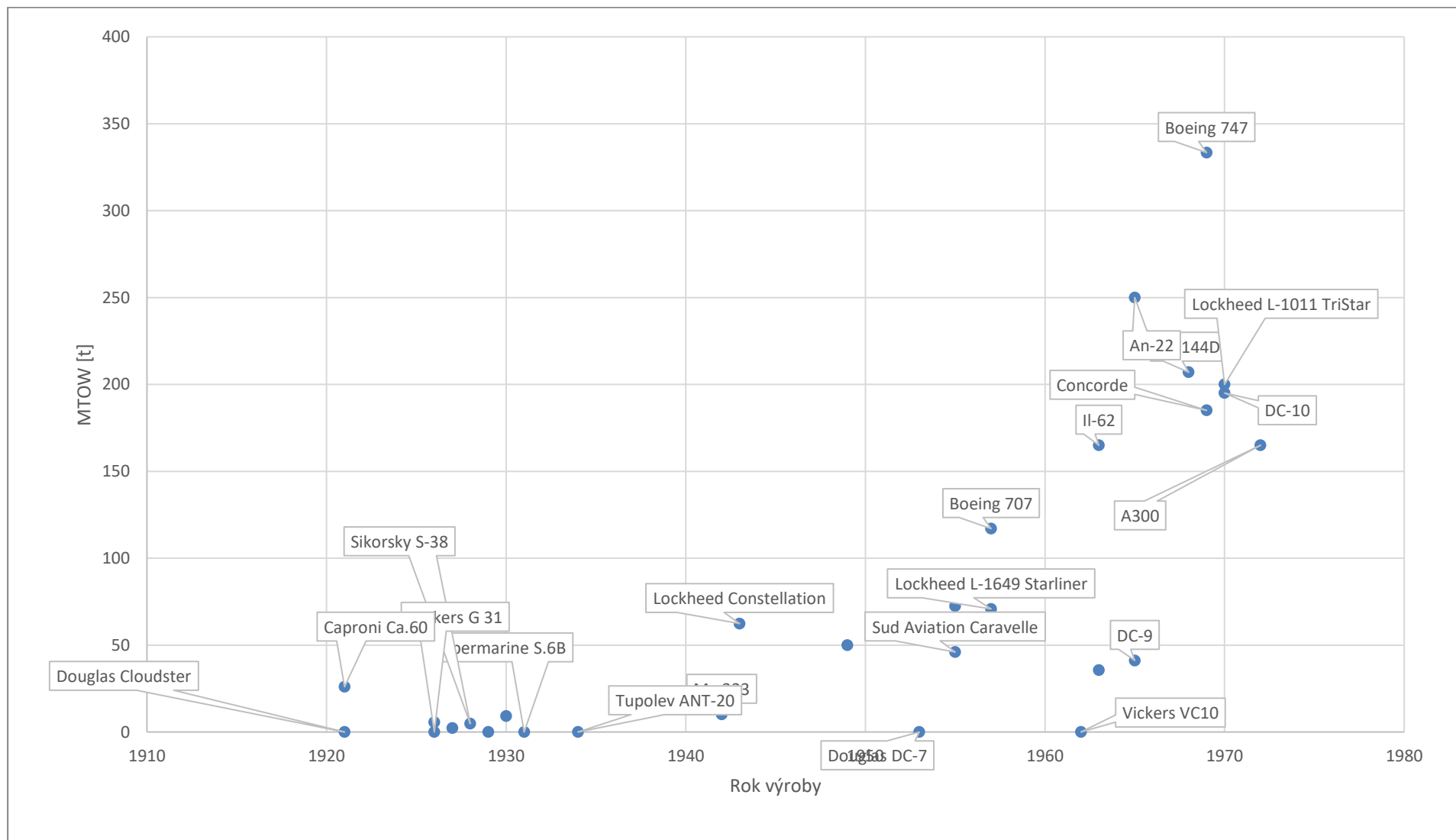
Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Motory	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [kg]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
A330-200	1994	120,5	60,3	58,92	17,39	12000	2		320	242000	871	247
A330-300		123,1	60,3	63,66	16,79	10200	2		320	242000	871	277
A340-200	1993	126	60,3	59,4	16,8	13805	4		145	275000	871	261
A340-300		129,8	60,3	63,69	16,99	12415	4		145	277000	871	277
B747-100	1969	162,21	59,64	70,7	19,33	9040	4		215,1	332500	895	452
B747-200		170,83	59,64	70,7	19,33	11850	4		243,62	372000	935	452
B747-300		174,04	59,64	59,64	19,33	13590	4		252,2	377850	930	470
B747-400		178,65	64,44	64,44	19,41	13600	4		258	394600	930	450
B747SP		147,29	59,64	59,64	19,94	13440	4		222,8	299400	938	370
B747SR		161,89	59,64	69,64	19,33	9000	4		213,5	332500	930	222
B767-200	1982	80,31	47,6	47,6	15,8	9400	2		222,4	142880	850	224
B767-200ER		82,38	47,6	47,6	15,8	12200	2		280,2	179170	850	224
B767-300		86,07	47,6	54,9	15,8	9700	2		222,4	158760	850	269
B767-300ER		90,01	47,6	54,9	15,8	11000	2		280,2	186880	850	269
B767-400ER		103,1	51,92	61,37	16,87	10418	2		282,5	204120	850	245
B777-200	1994	134,8	60,9	63,7	18,4	5460	2		342	229500	890	400
B777-200ER		138,1	60,9	63,7	18,4	16328	2		417	340200	895	400
B777-300		160,5	60,9	73,85	18,4	10200	2		436	260000	890	451
B777-300ER		167,8	60,9	73,85	18,4	13350	2		514	340200	895	451
IL-62	1967	66,4	43,2	53,12	12,3	6700	4		103	162000	935	186
IL-62M		67	43,2	53,12	12,3	8000	4		112,8	165000	935	204
IL-96-300	1993	117	60,11	55,35	17,57	9000	4		156,9	216000	900	300
L-1011-1	1972	101,12	47,34	54,35	16,87	5319	3		186,7	195050	890	400
L-1011-100		110,72	47,34	54,35	16,87	6783	3		193,5	211375	890	400
L-1011-200		111,5	47,34	54,17	16,87	6280	3		213,5	216363	899	400

Letoun	Rok výroby	Hmotnost [t]	Rozpětí [m]	Délka [m]	Výška [m]	Dolet [km]	Motory	Výkon [kW]	Tah [kN]	MTOW [kg]	Rychlost [km·h ⁻¹]	Kapacita
L-1011-250		105,07	50,09	48,01	16,87	5925	3		186,86	174790	899	230
L-1011-500		109,02	47,34	50,33	16,87	9653	3		213,56	25184	899	300
DC-10-10	1971	105,82	47,34	55,3	17,7	4355	3		182,4	199580	928	308
DC-10-30		119,52	50,41	55,5	17,7	7040	3		219,5	251744	930	380
DC-10-40		121,22	50,41	55,5	17,7	6485	3		218	251744	906	380
MD-11	1990	131,04	51,77	61,24	17,6	12569	3		273,6	273289	876	323

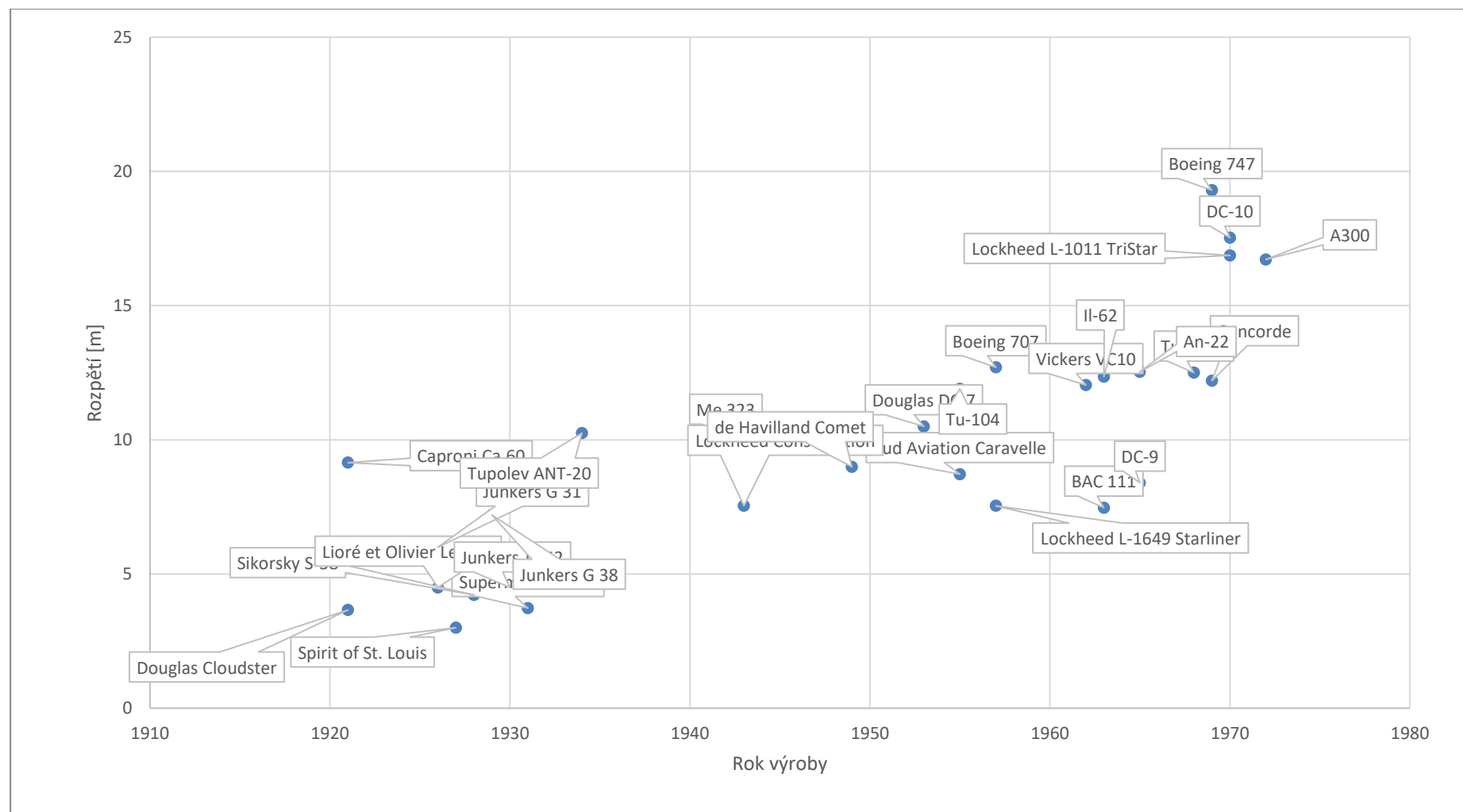
Tab. 4 – Seznam letadel od 60. let na dlouhé tratě [82]



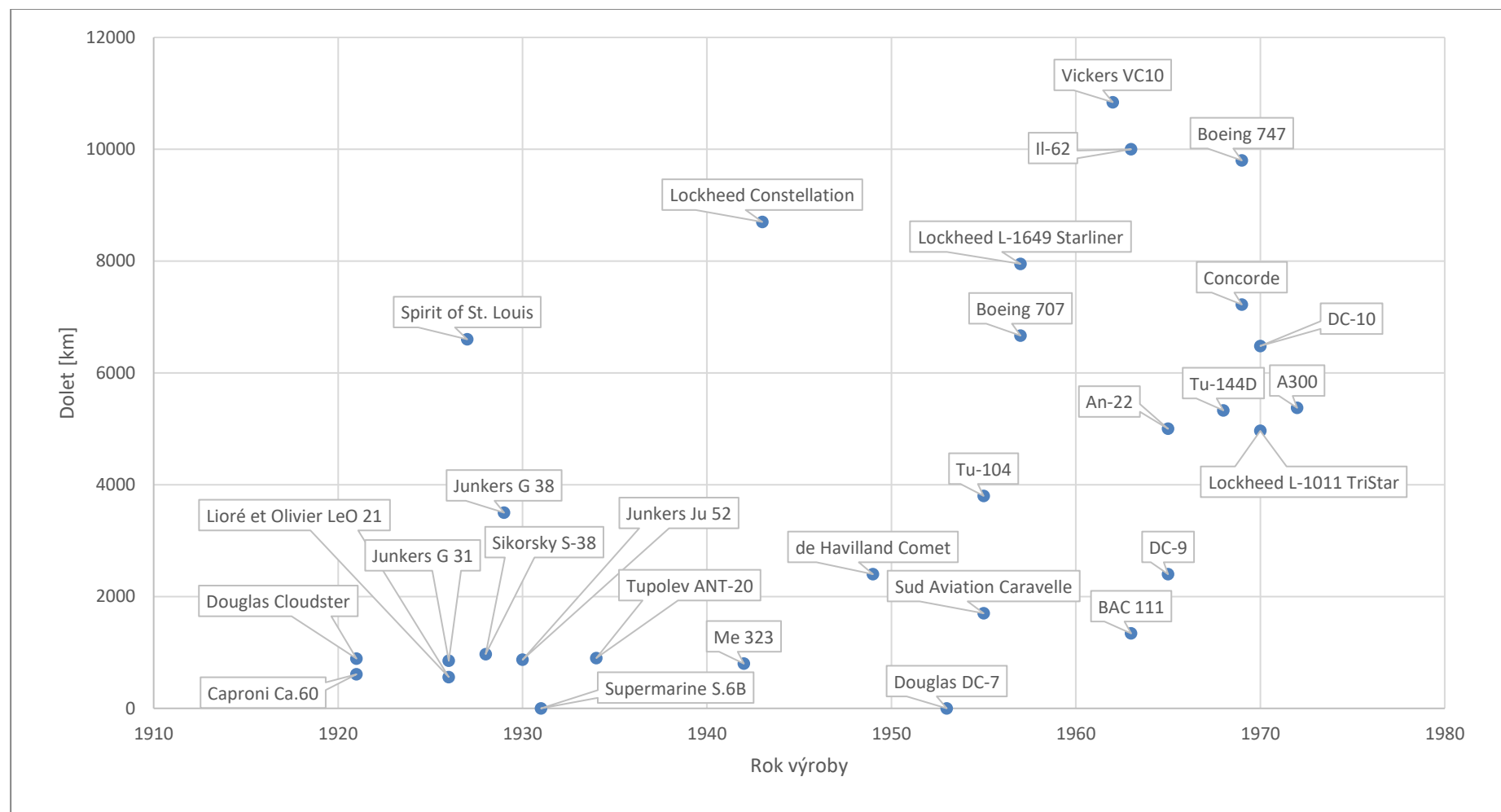
Graf. 1 – Vývoj hmotnosti konstrukce letadel



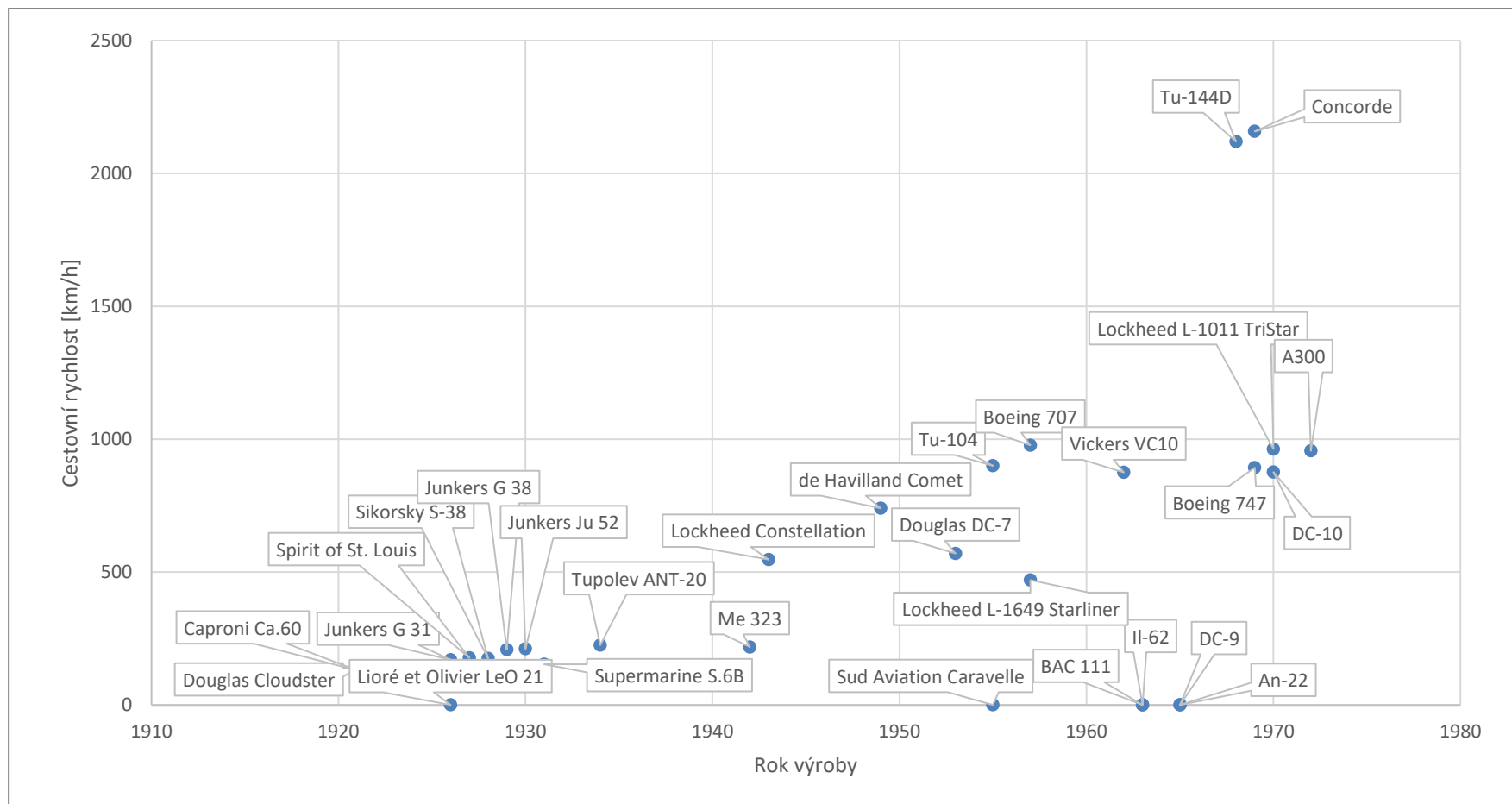
Graf. 2 – Vývoj MTOW



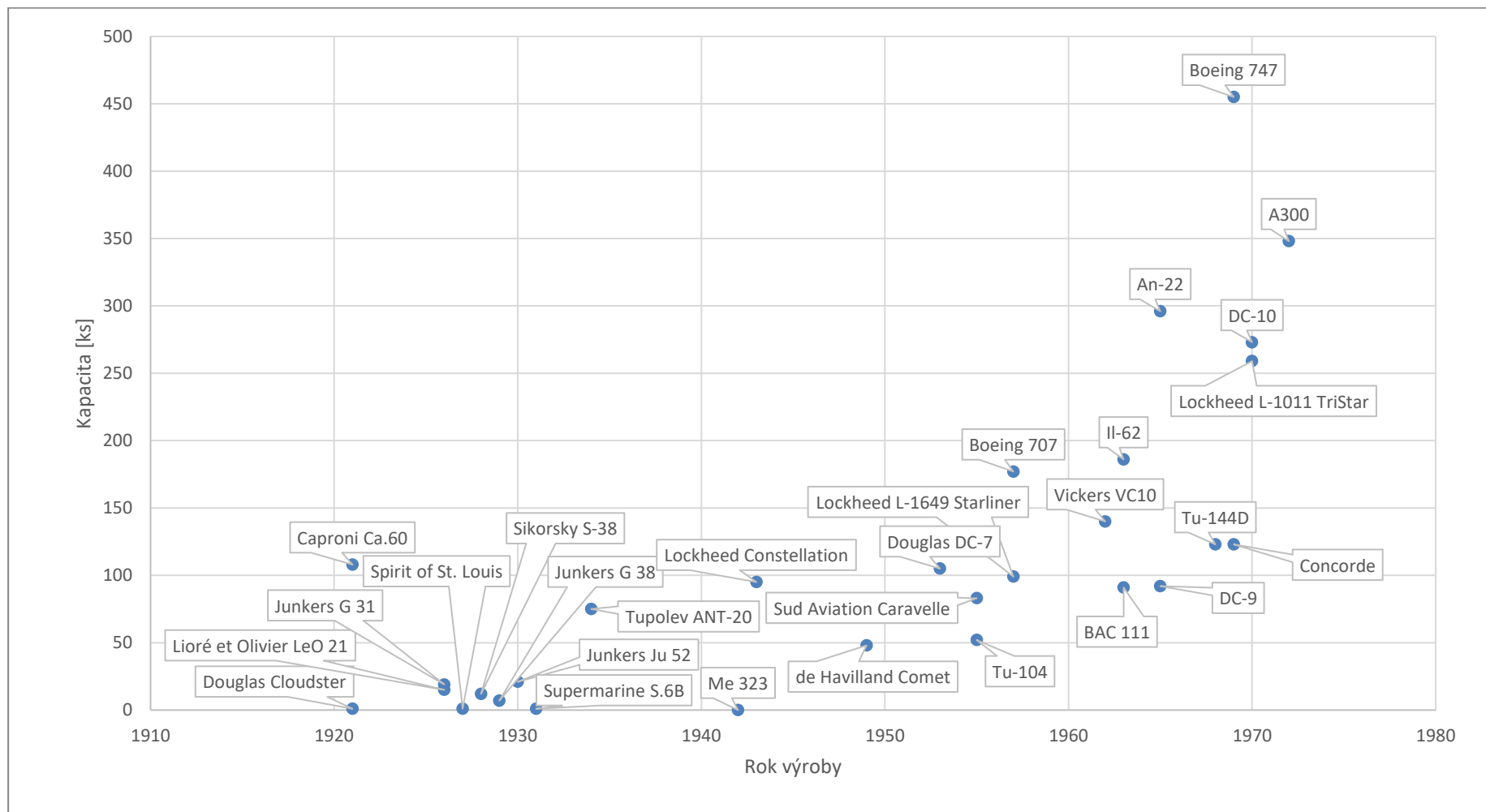
Graf. 3 – Vývoj rozpětí křídel letadel



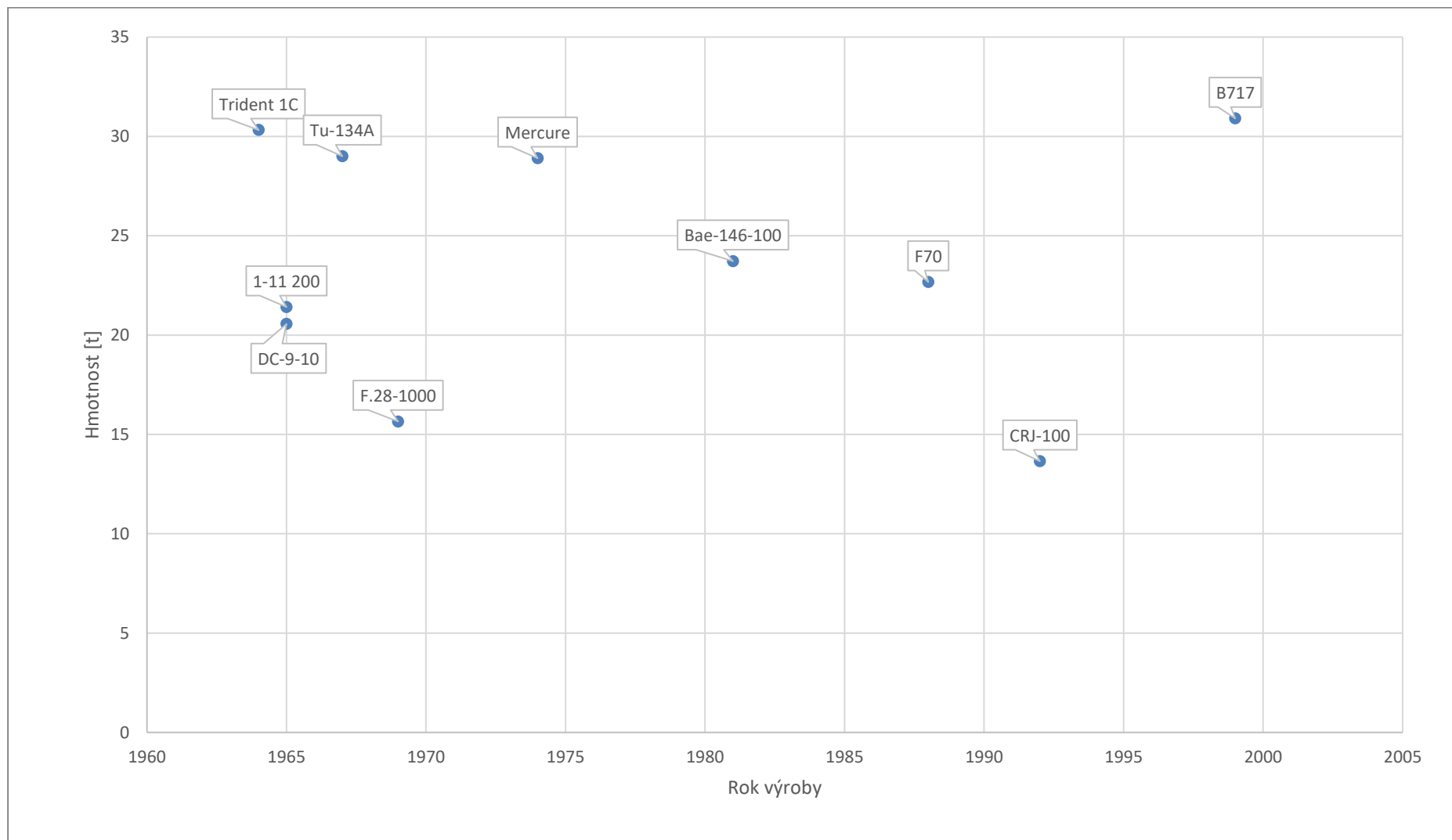
Graf. 4 – Vývoj doletu letadel



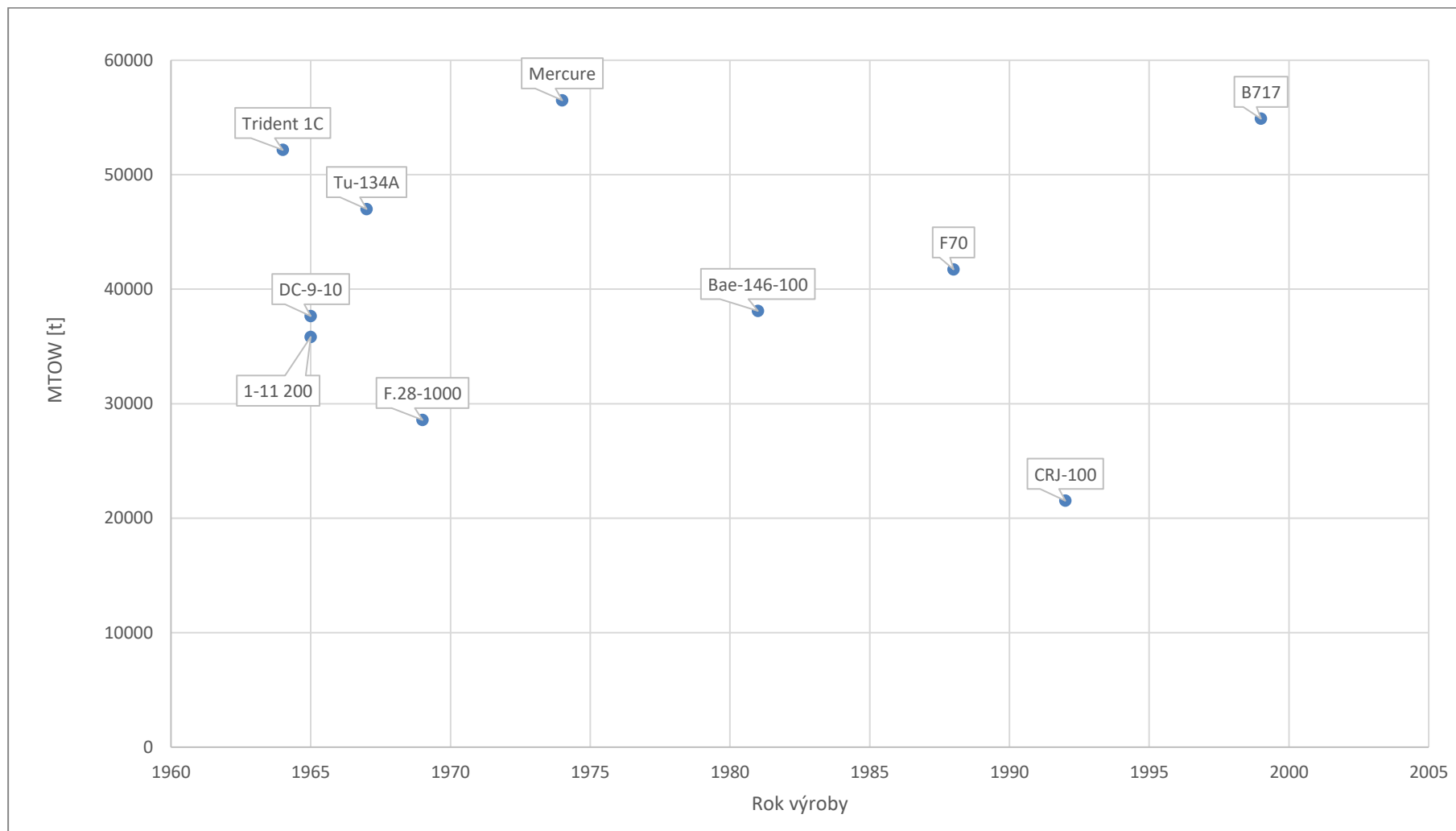
Graf. 5 – Vývoj cestovní rychlosti letadel



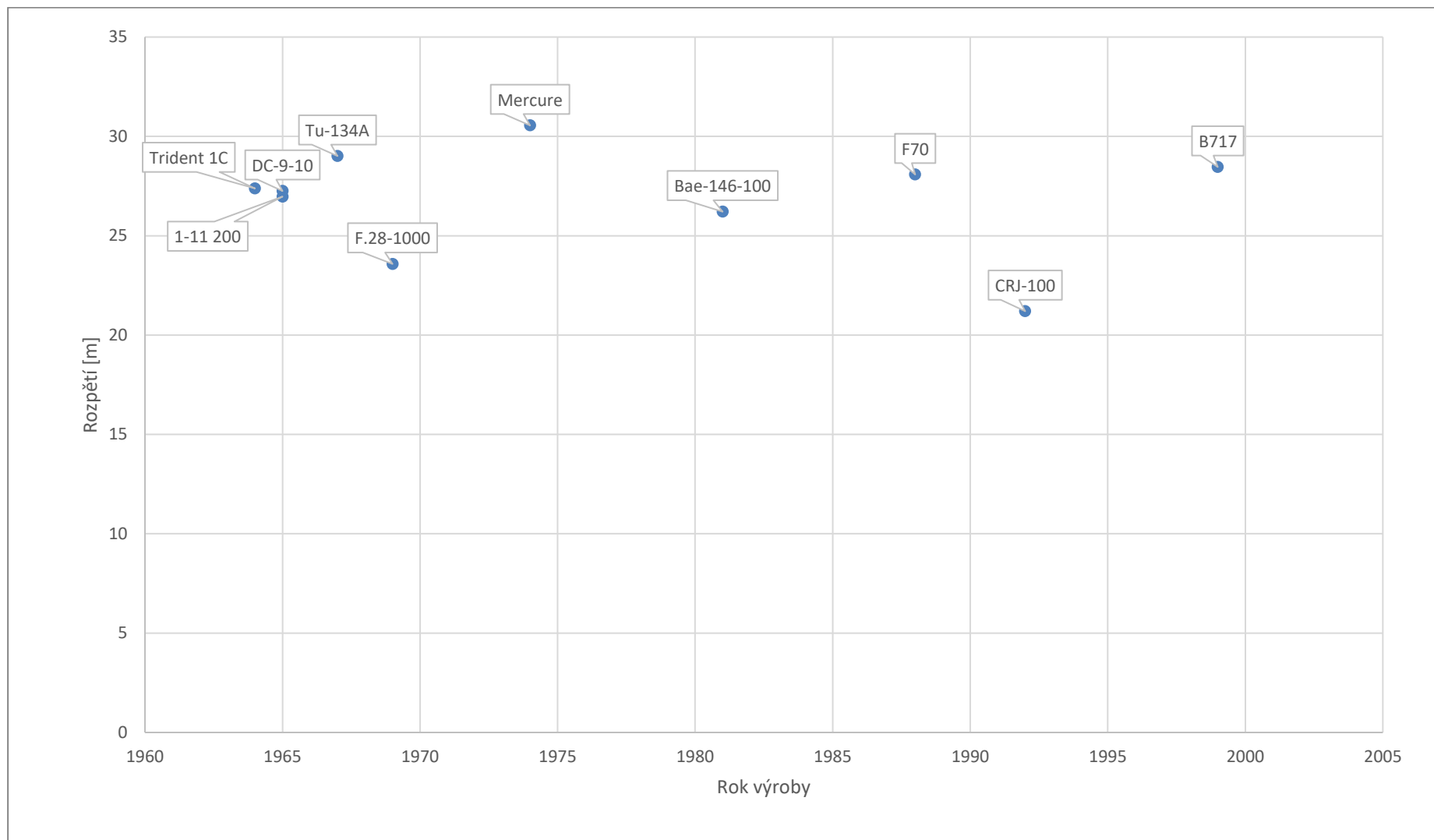
Graf. 6 – Vývoj kapacity letadel



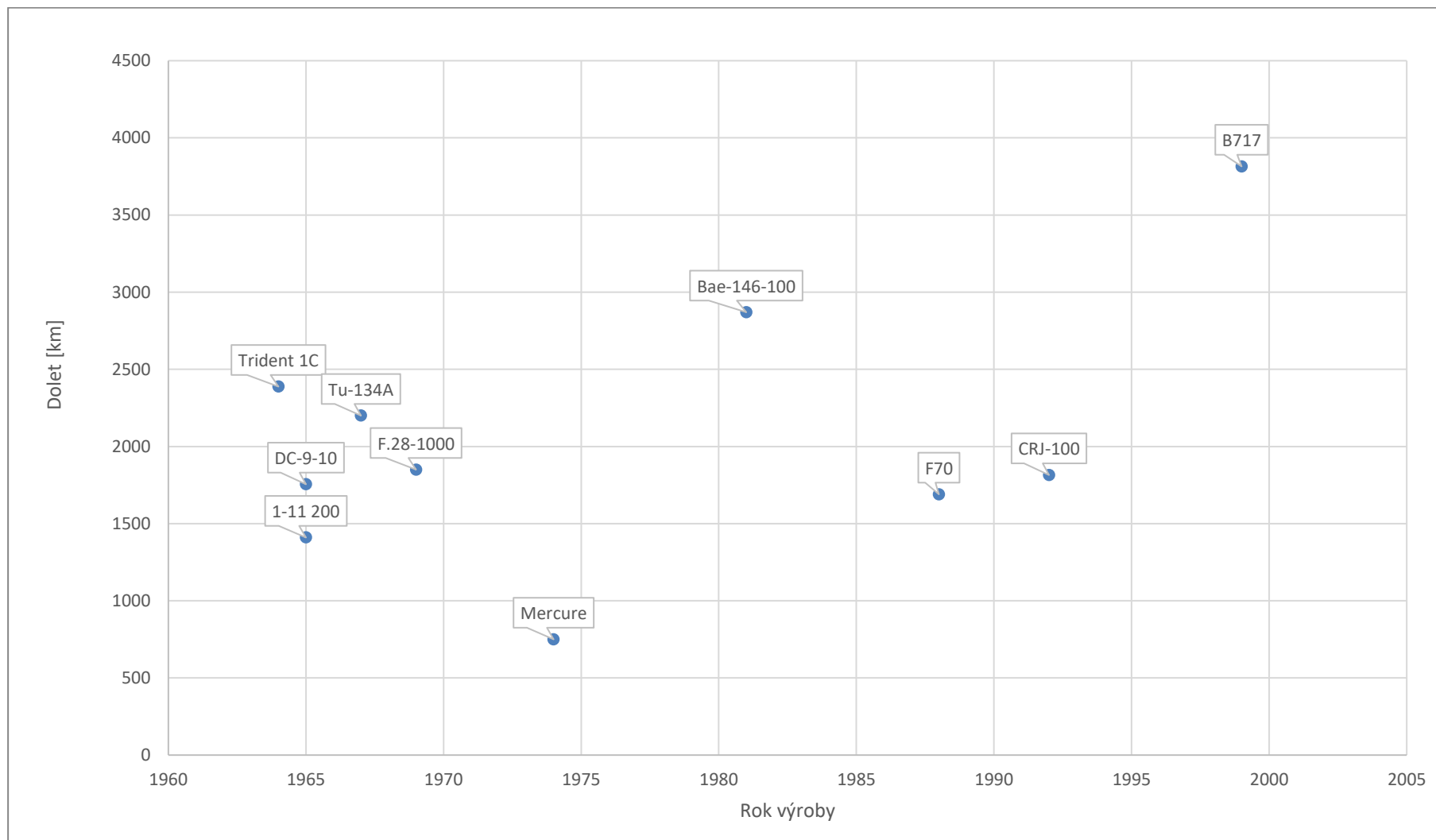
Graf. 7 – Vývoj hmotnosti konstrukce letadel krátké tratě



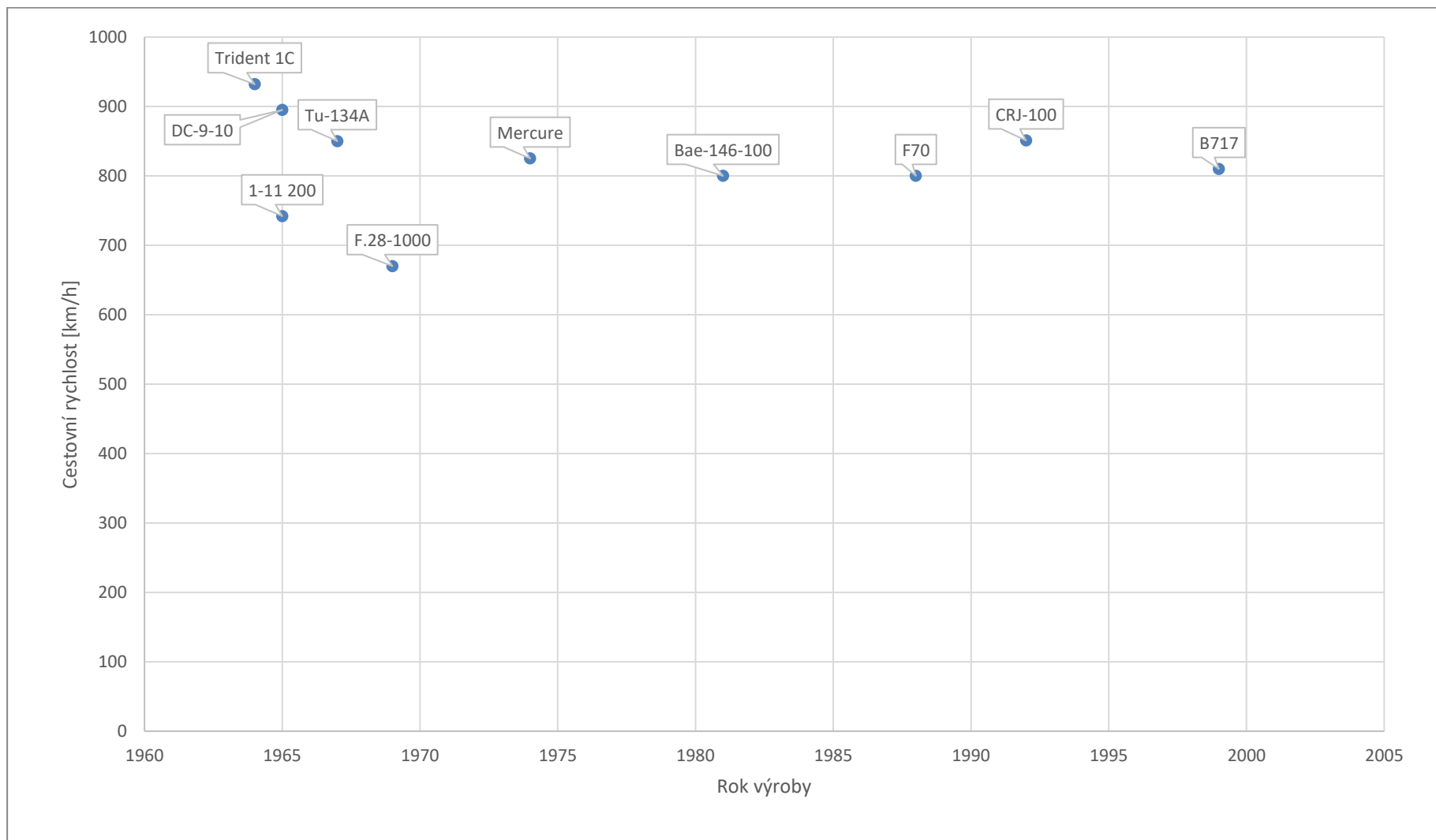
Graf. 8 – Vývoj MTOW krátké tratě



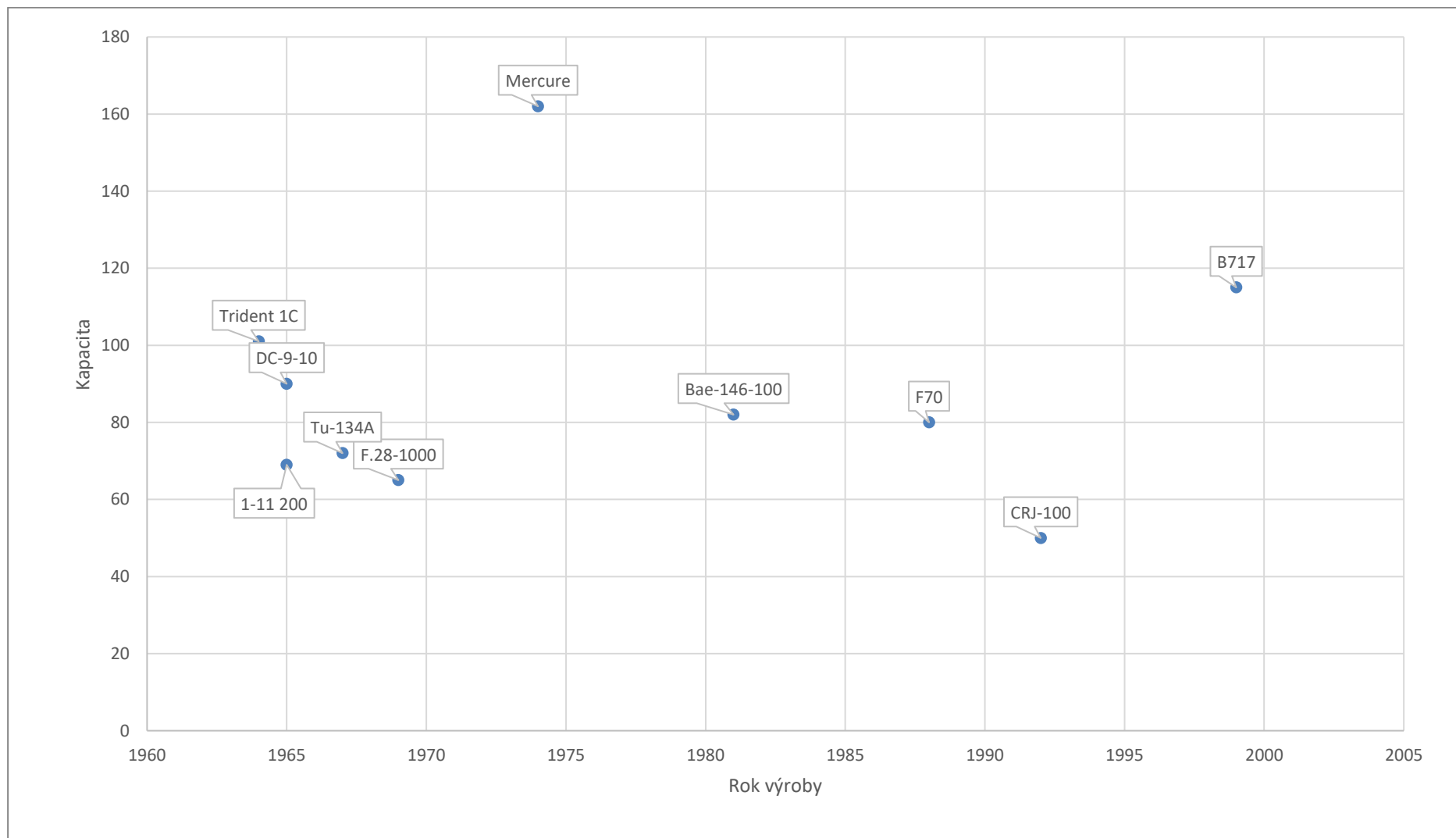
Graf. 9 – Vývoj rozpětí křídel letadel krátké tratě



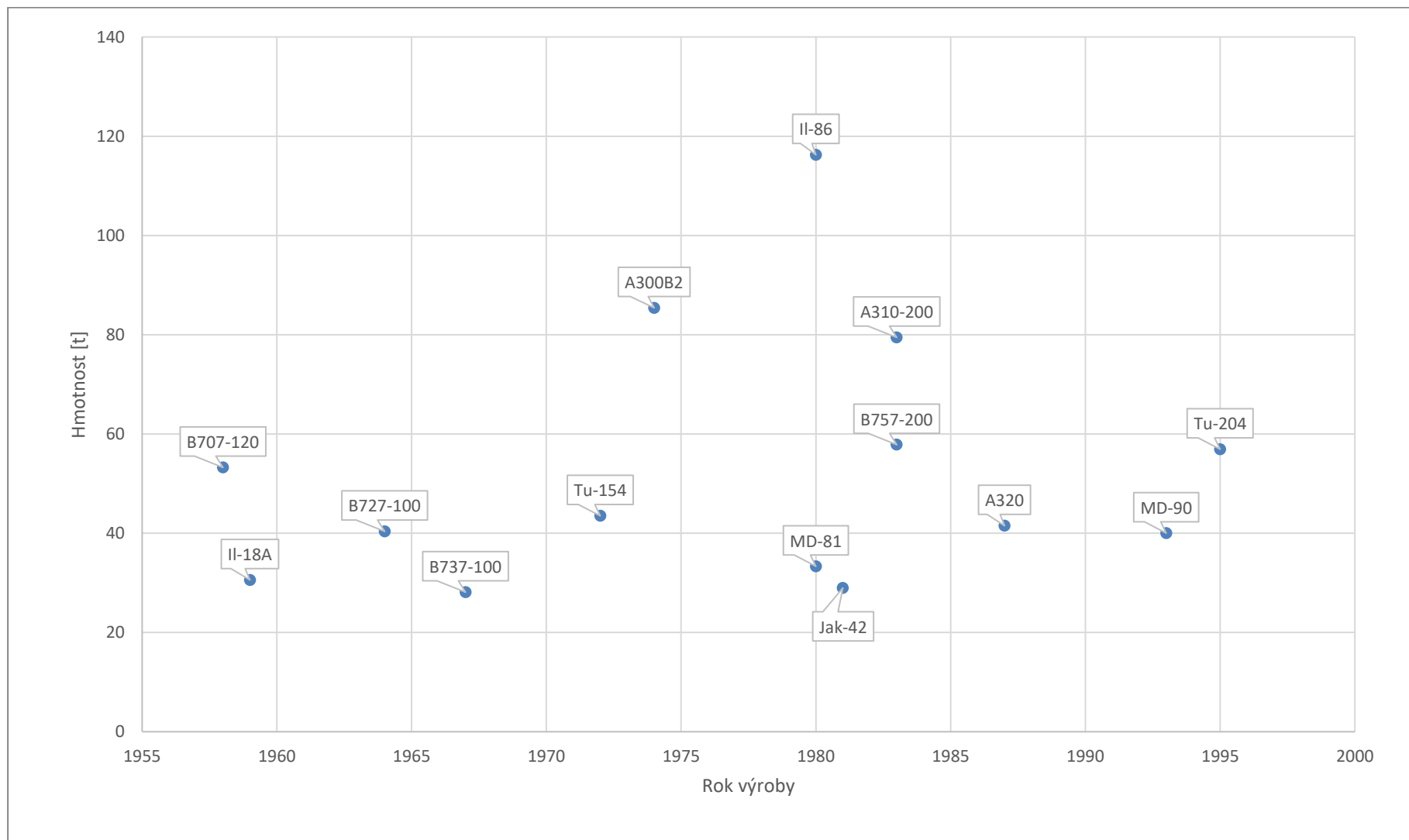
Graf. 10 – Vývoj doletu letadel krátké tratě



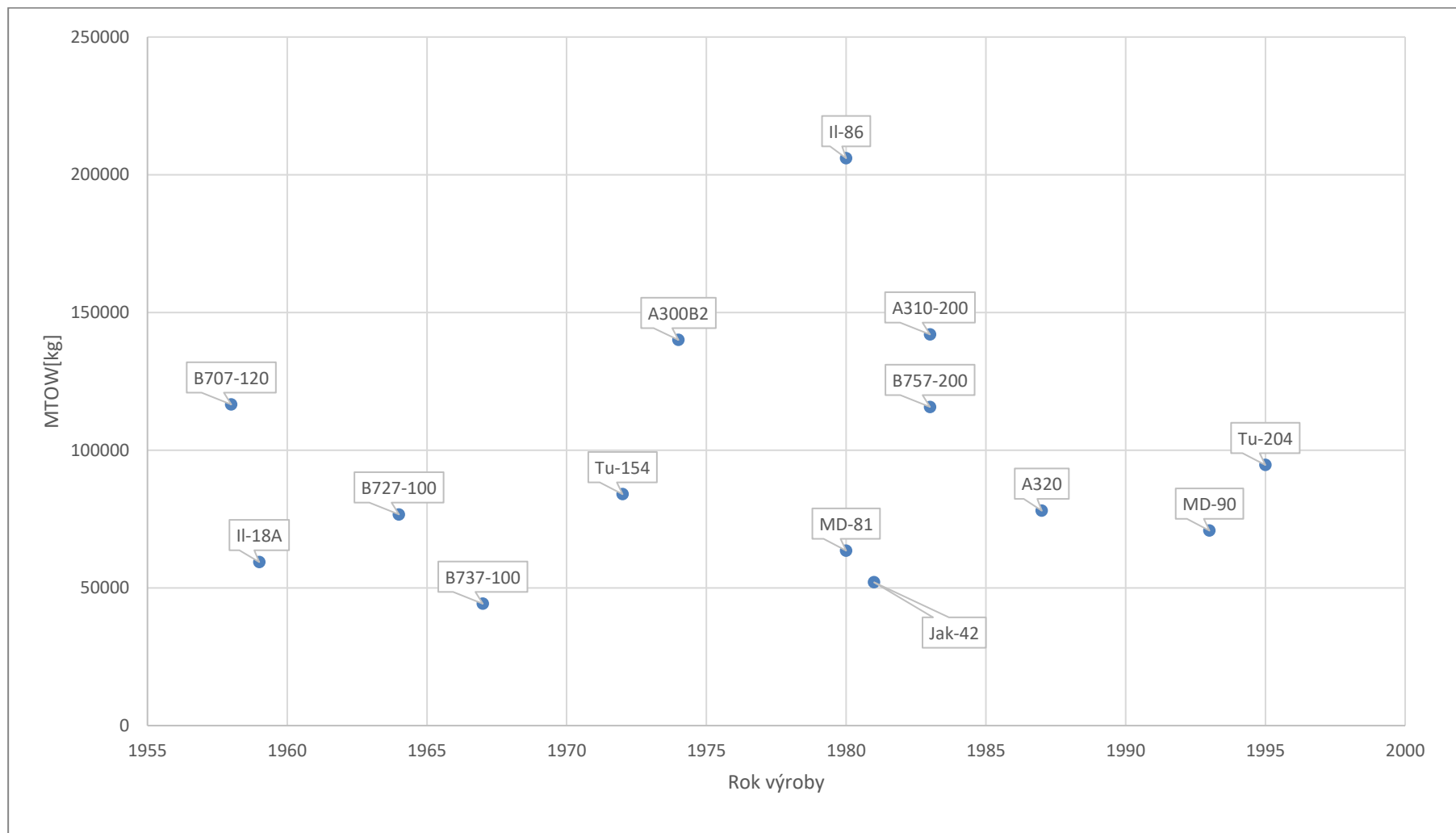
Graf. 11 – Vývoj cestovní rychlosti letadel krátké tratě



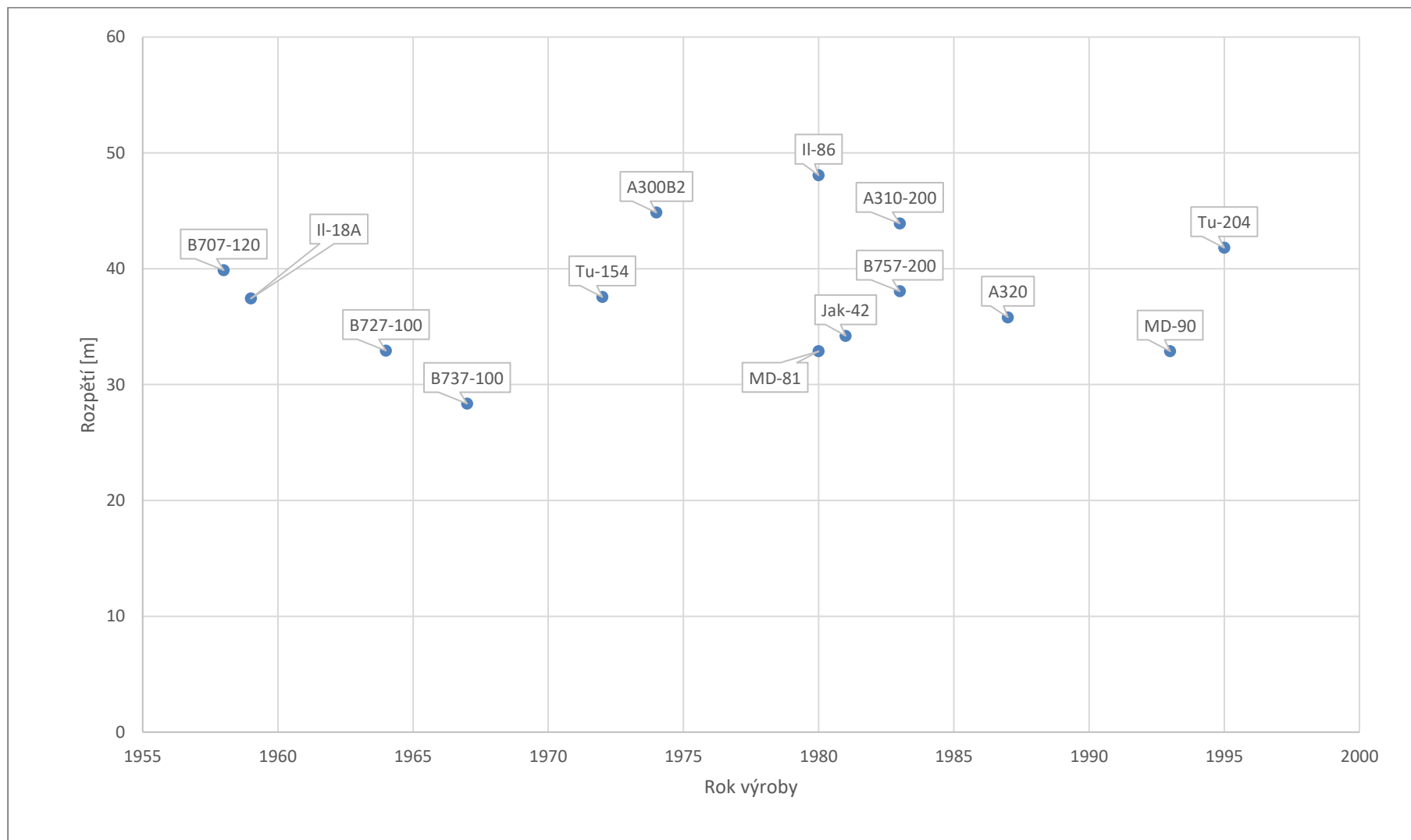
Graf. 12 – Vývoj kapacity letadel krátké tratě



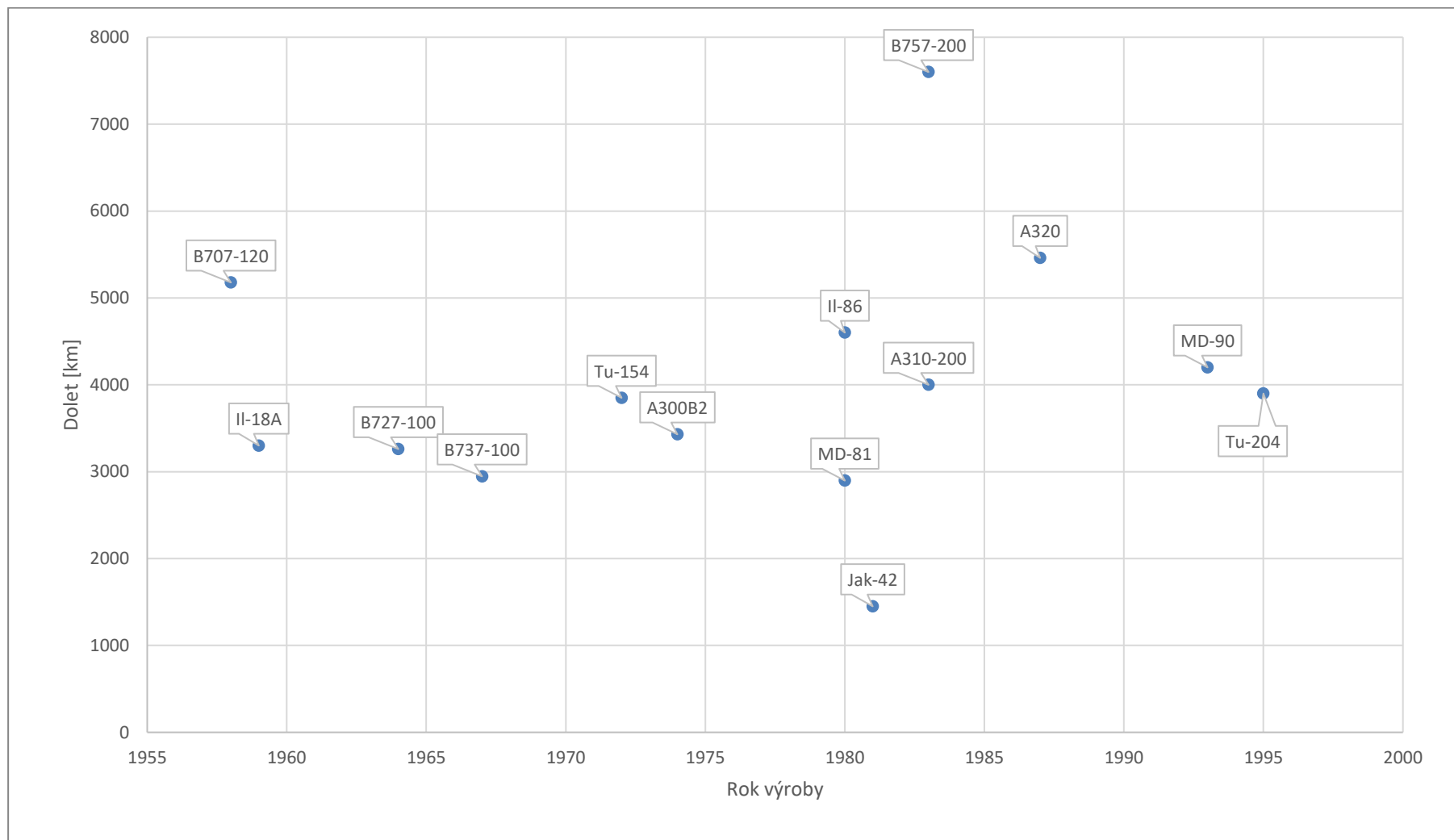
Graf. 13 – Vývoj hmotnosti konstrukce letadel střední tratě



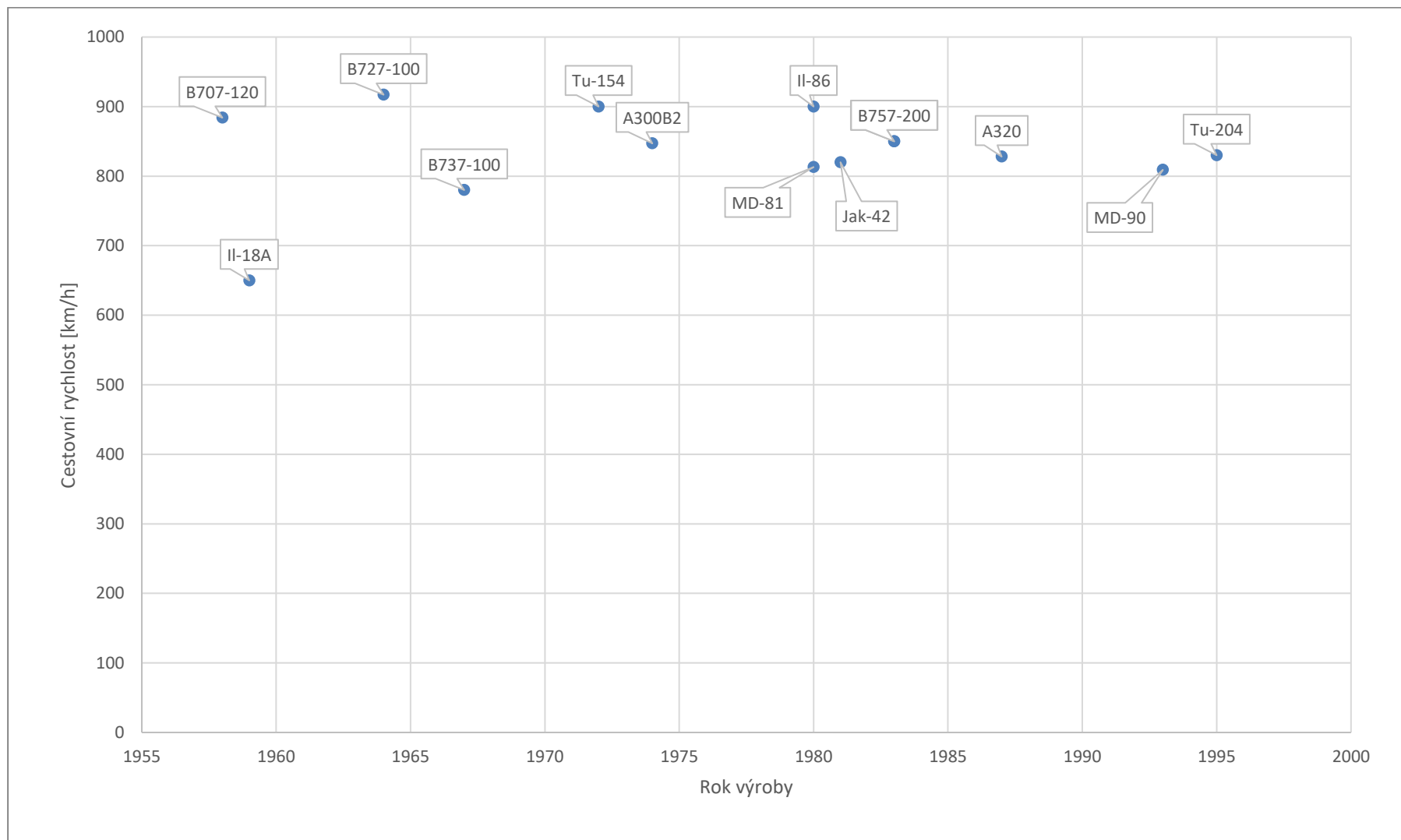
Graf. 14 – Vývoj MTOW střední tratě



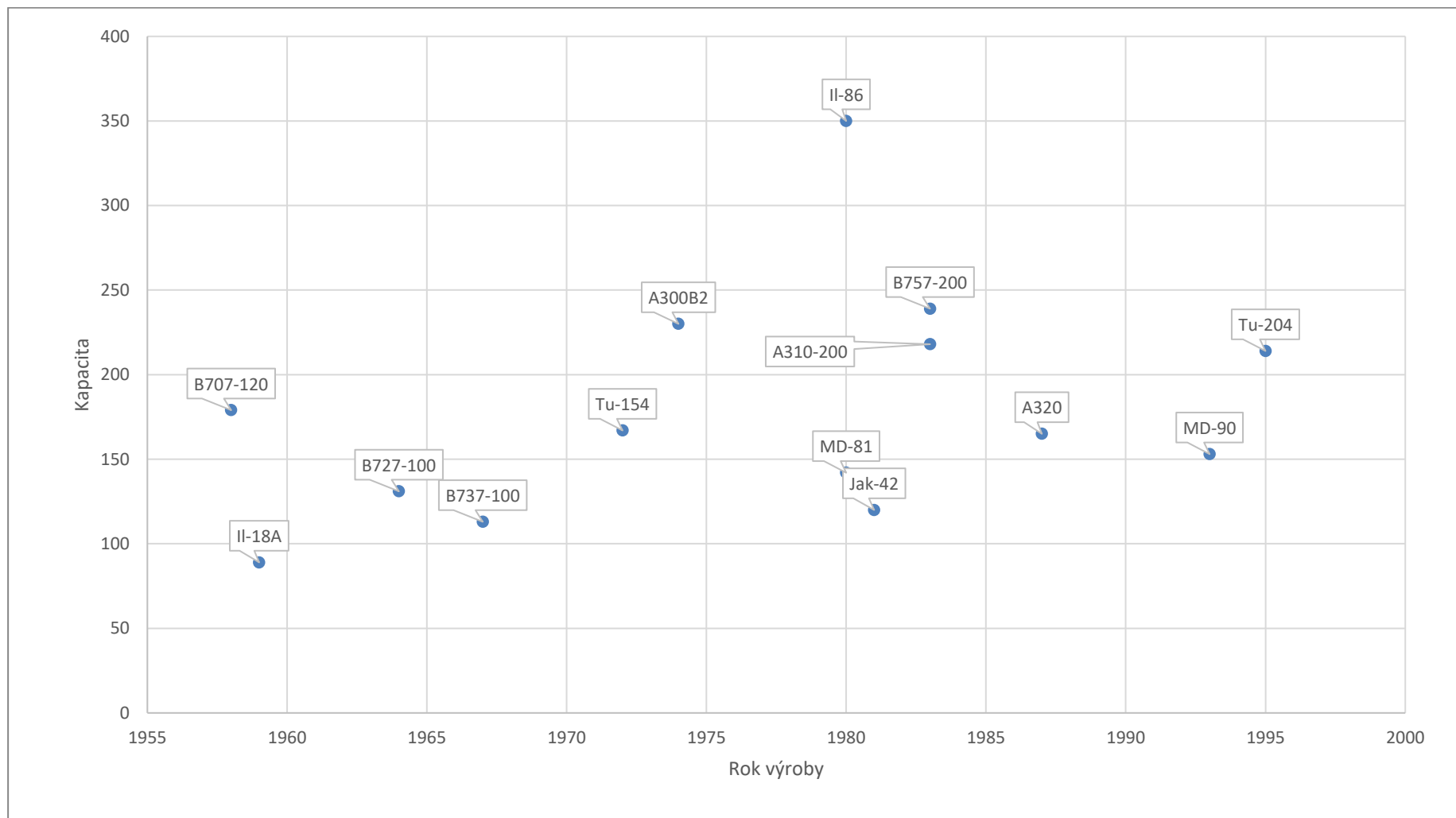
Graf. 15 – Vývoj rozpětí křídel letadel střední tratě



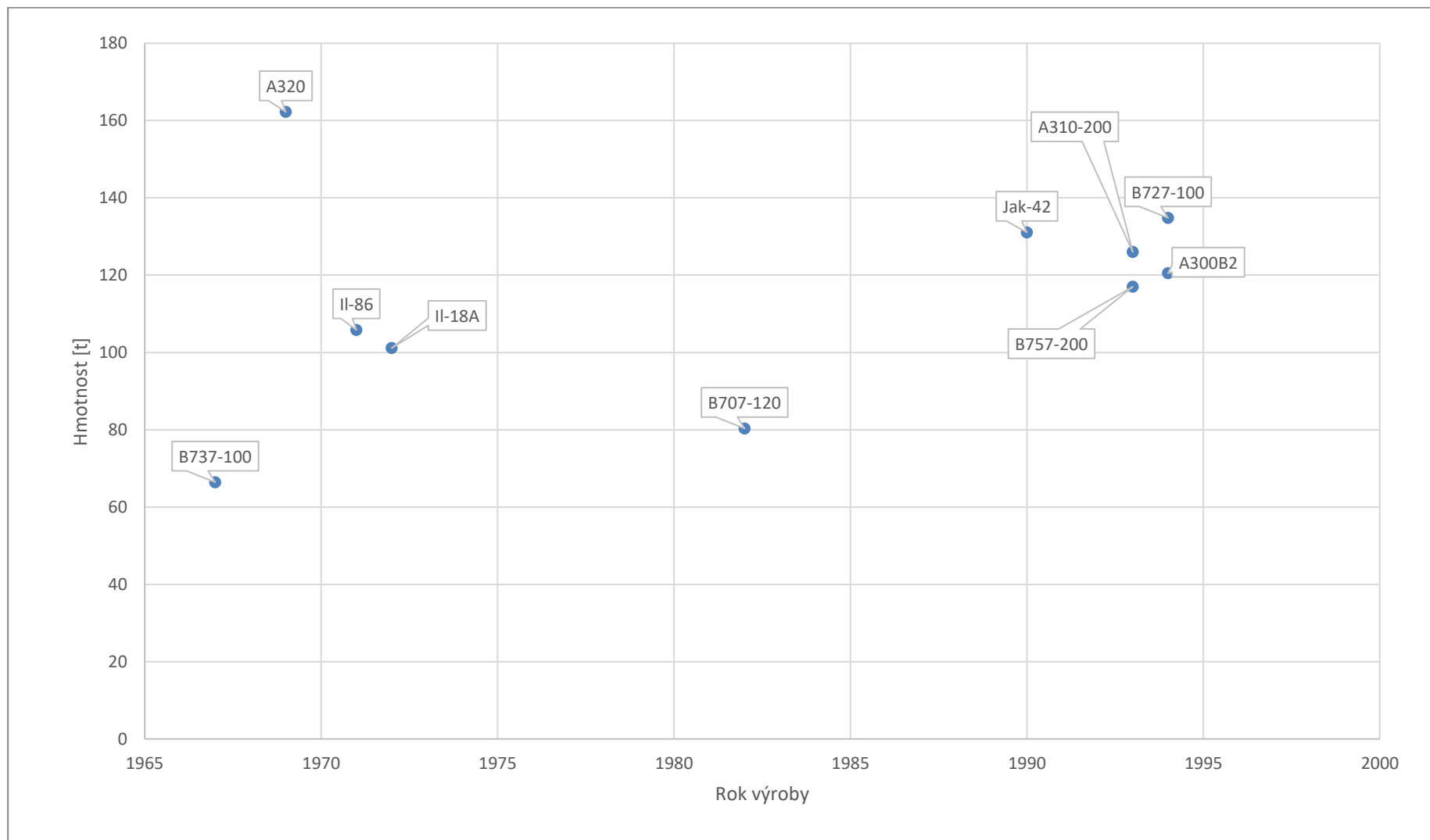
Graf. 16 – Vývoj doletu letadel střední tratě



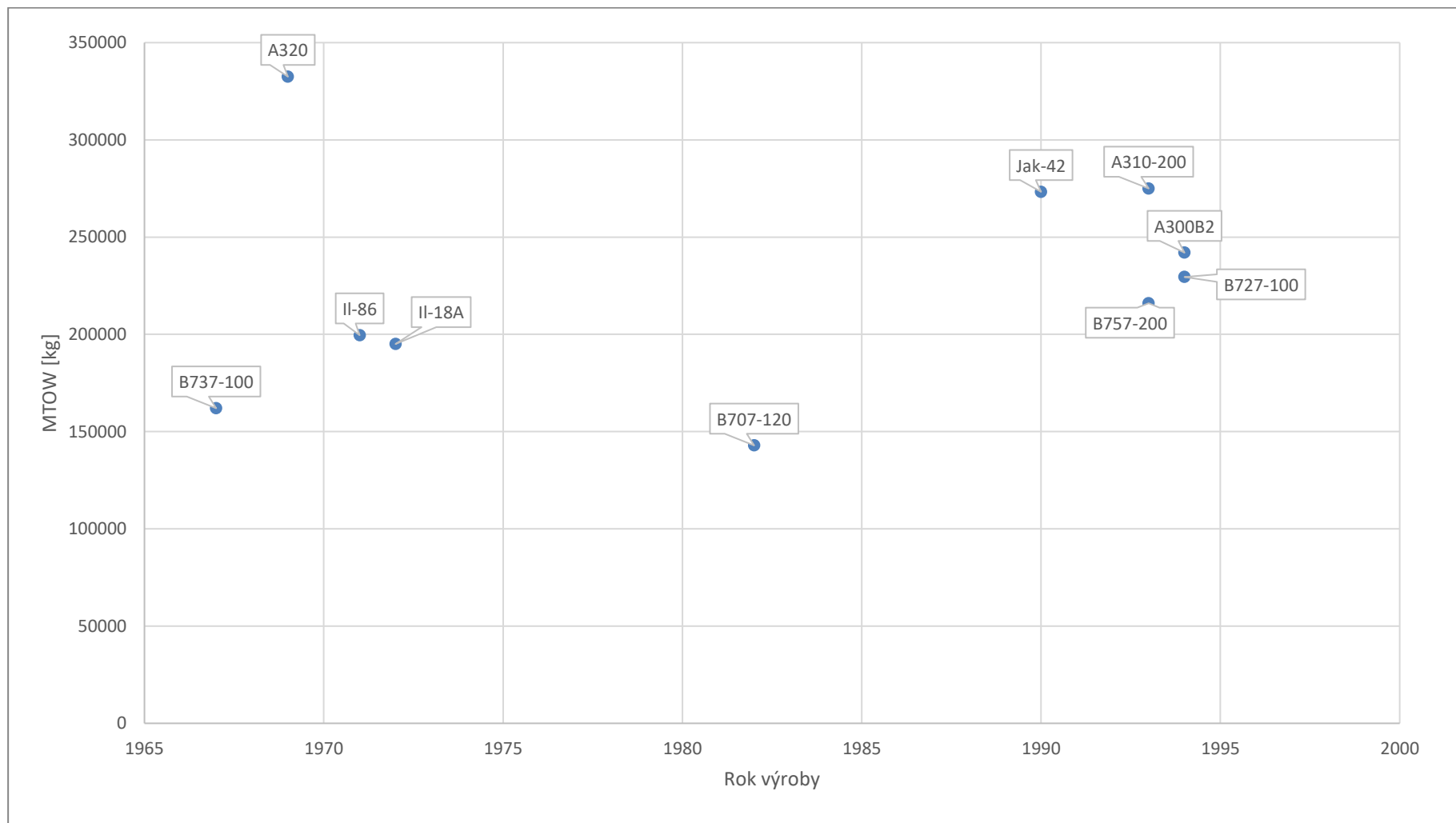
Graf. 17 – Vývoj cestovní rychlosti letadel střední tratě



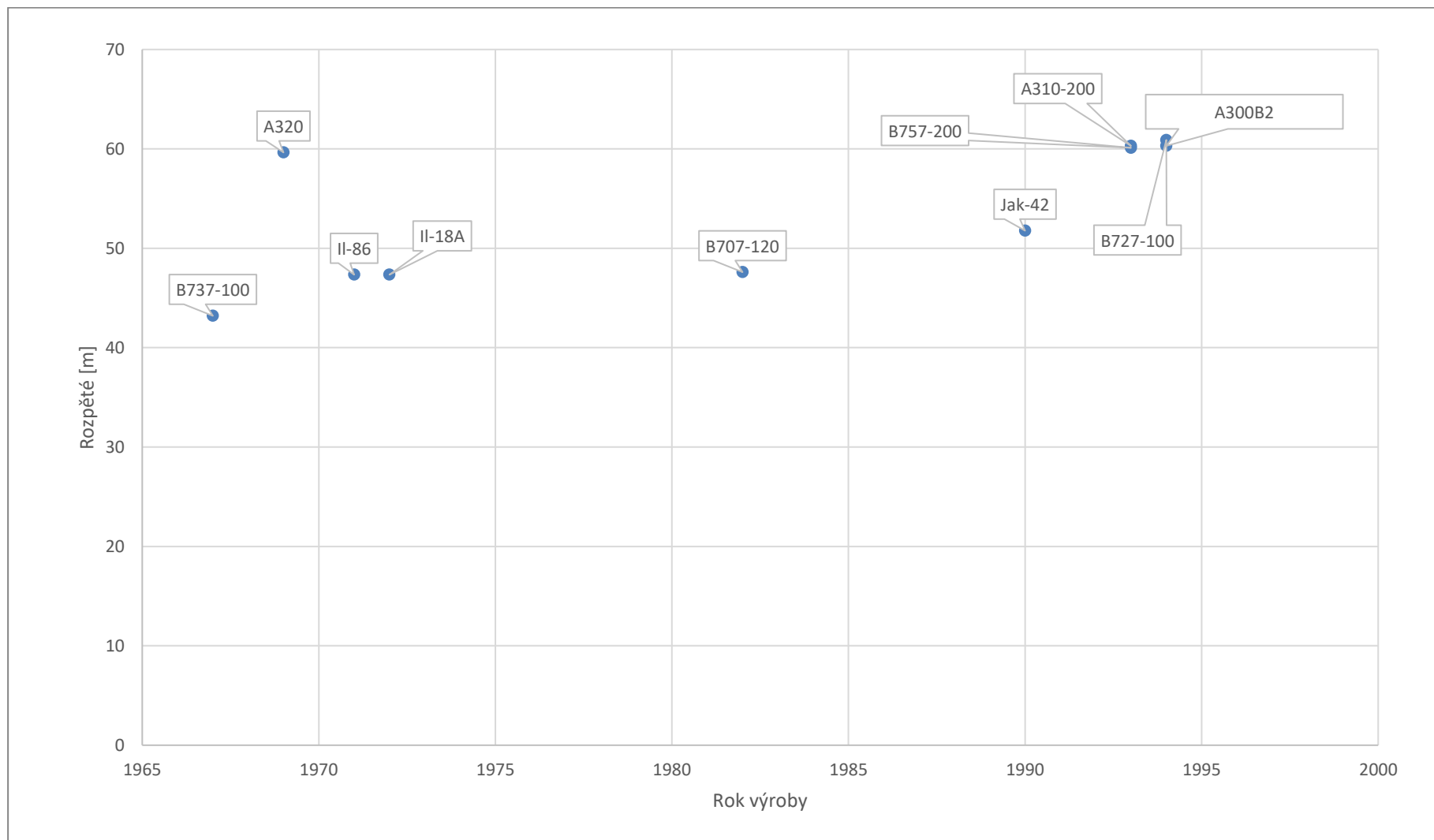
Graf. 18 – Vývoj kapacity letadel střední tratě



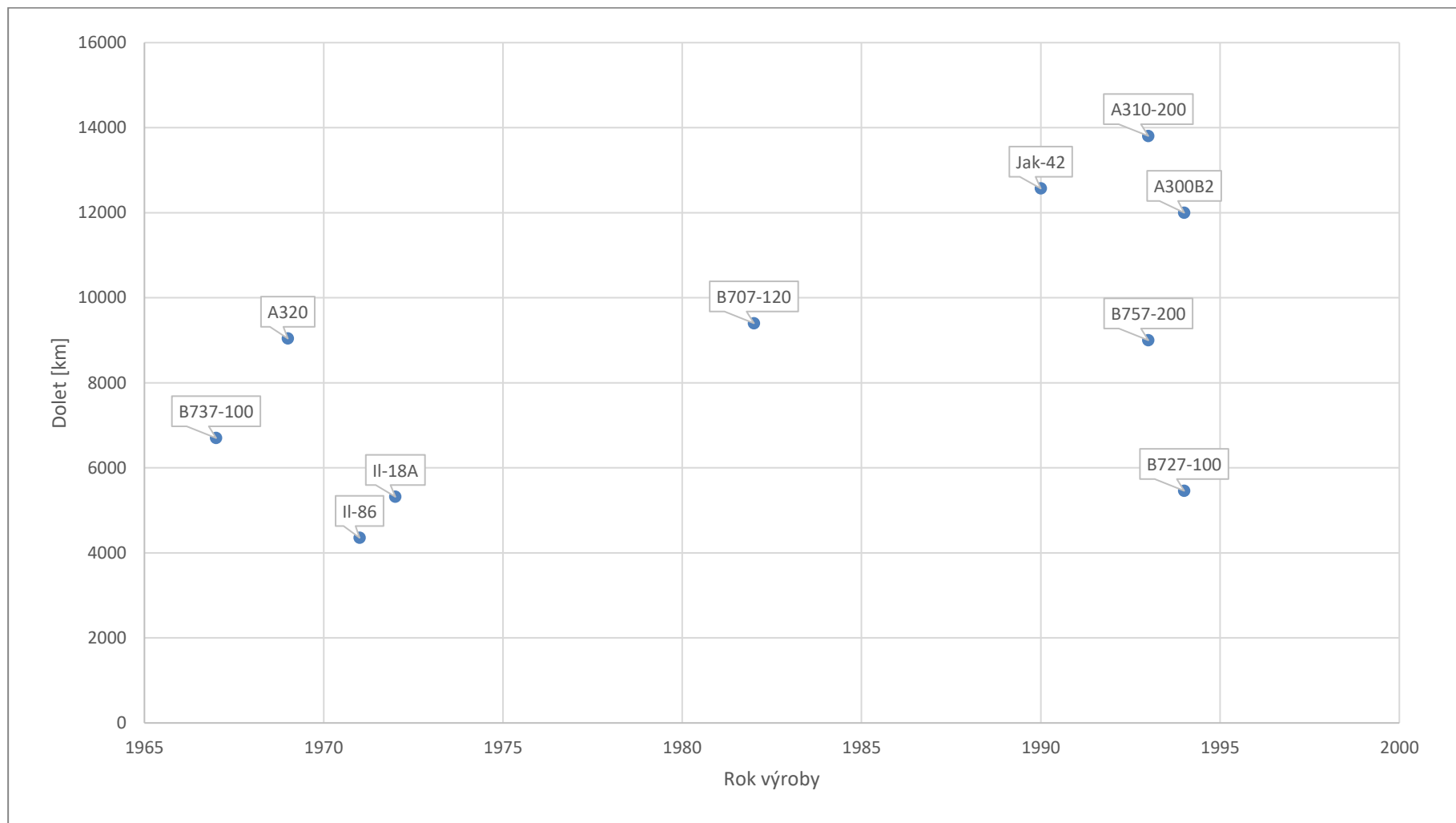
Graf. 19 – Vývoj hmotnosti konstrukce letadel dlouhé tratě



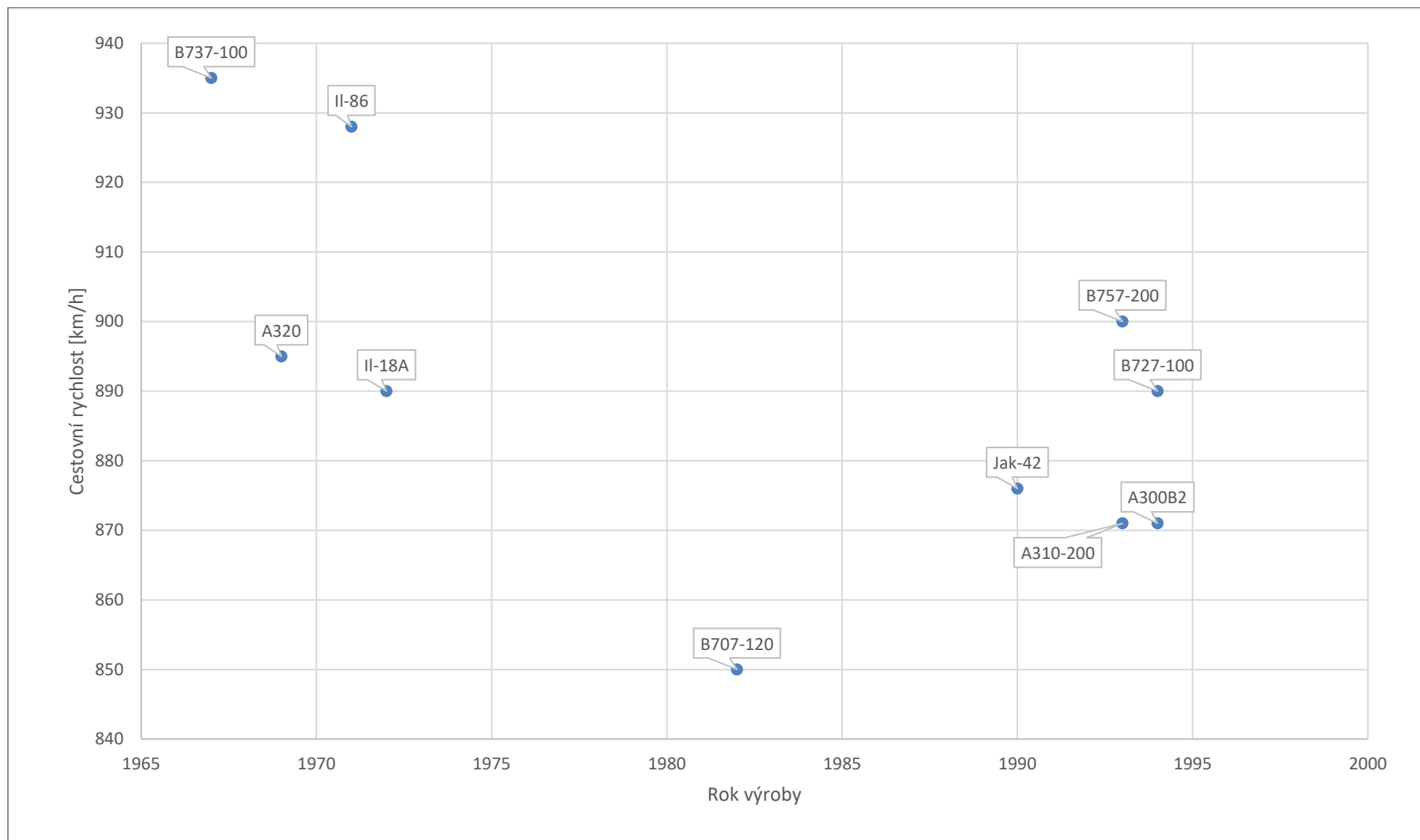
Graf. 20 – Vývoj MTOW dlouhé tratě



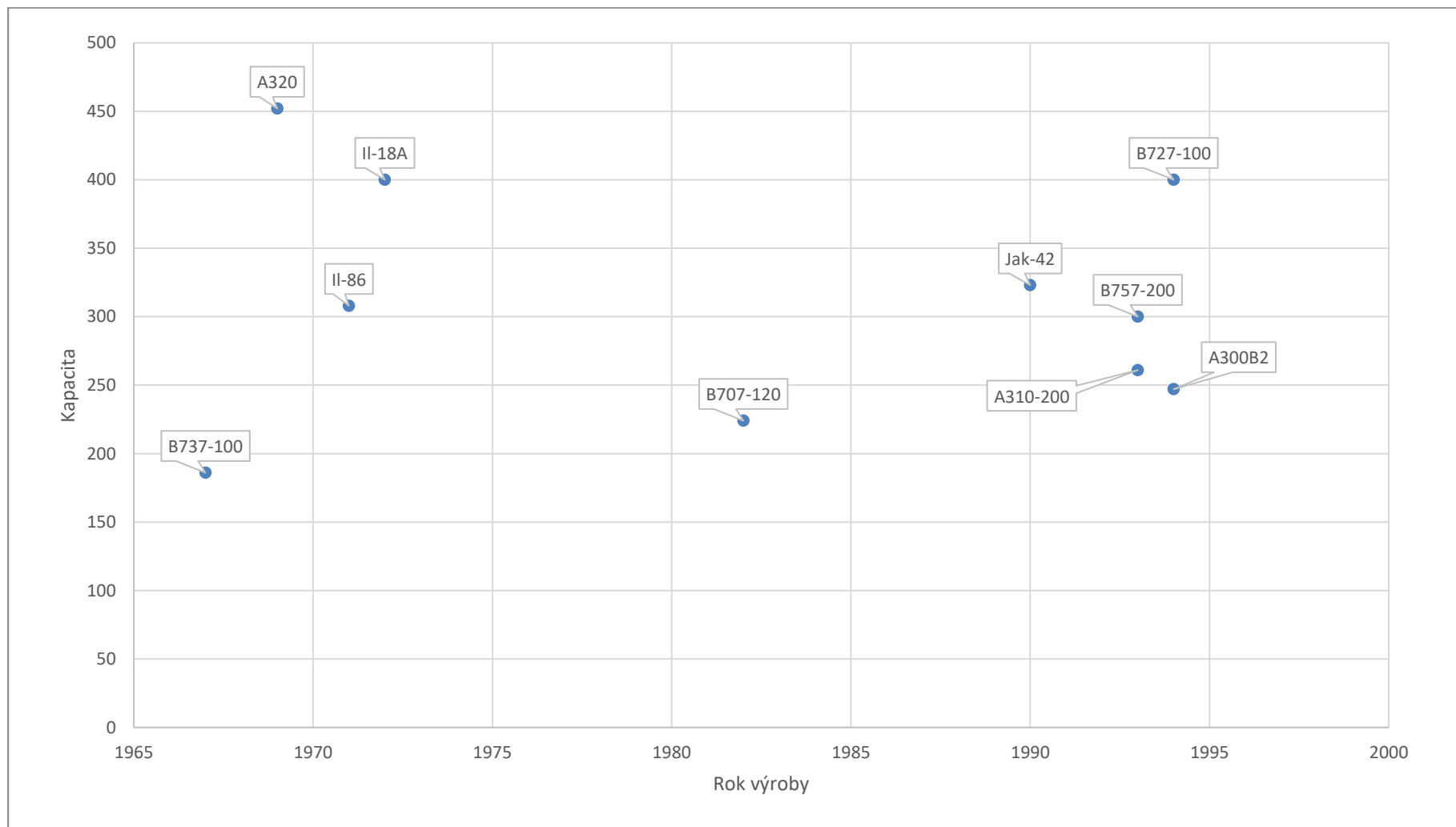
Graf. 21 – Vývoj rozpětí křídel letadel dlouhé tratě



Graf. 22 – Vývoj doletu letadel dlouhé tratě



Graf. 23 – Vývoj cestovní rychlosti letadel dlouhé tratě



Graf. 24 – Vývoj kapacity letadel dlouhé tratě

